



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JOHANNES KOMULAINEN
SUURET KUORMAA KANTAVAT HYBRIDI- JA
KOMPOSIITTIRAKENTEET

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone ja
materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 12. tammikuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

KOMULAINEN, JOHANNES: Suuret kuormaa kantavat hybridi- ja

komposiittirakenteet

Diplomityö, 49 sivua, 8 liitesivua

Huhtikuu 2011

Pääaine: Yleinen materiaalioppi

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen

Avainsanat: Alipaineinjektio, kuitulujitetut komposiitit, hybridirakenteet, komposiittien liittäminen, liimaus, materiaalin valinta, pultruusio, suuret rakenteet

Tämä työ kertoo kuormaa kantavista komposiitti- ja hybridimateriaaleista erilaisiin käyttökohteisiin. Komposiittimateriaalien käyttö näissä käyttökohteissa on kasvanut lähivuosina nopeasti. Esimerkiksi kevyiden siltojen kansissa erilaiset komposiitti- ja hybridimateriaalit ovat yleistyneet viimeisen kymmenen vuoden aikana ja korvanneet perinteisiä materiaaleja, kuten puuta, terästä ja betonia. Näiden uusien materiaalien parhaat ominaisuudet ovat hyvä painon, jäykkyyden ja lujuuden suhde, erinomainen kemiallinen kestävyys ja vähäiset huoltokustannukset. Joissakin käyttökohteissa, kuten tuulivoimalan lavoissa, komposiittimateriaalit ovat ainoa riittävän kevyt, jäykkä ja kustannuksiltaan kohtuullinen materiaalityyppi.

Vaikka komposiittimateriaalit ovat tällä hetkellä hinnaltaan perinteisiä materiaaleja kalliimpia, niiden käyttökustannukset elinikänsä aikana voivat kuitenkin olla edullisemmat. On olemassa runsaasti erilaisia kaupallisia tuotteita, joissa hyödynnetään joko komposiitti- tai hybridimateriaaleja ja myös näistä on kerrottu työn puitteissa.

Työn loppuosa koostuu testauksesta. Testaukseen tilattiin Exel Composites Oy:ltä pultruusiolla valmistettua lasikuitulujitettua polyesteriprofiilia, josta valmistettiin noin kaksi metriä pitkä ja puoli metriä leveä paneeli sahaamalla ja liimaamalla. Valmiin paneelin lujuus testattiin kolmipistetaivutuksella ja sen ominaisuudet osoittautuivat hyväksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Science

KOMULAINEN, JOHANNES: Large load-bearing hybrid and composite structures

Master of Science Thesis, 49 pages, 8 Appendix pages

April 2011

Major: General Materials Science

Examiner: Professor Jyrki Vuorinen

Keywords: Composites, GRP, hybrid structures, large structures, joining of composites, pultrusion, selection of materials, vacuum infusion

This thesis is about structural composites and hybrid materials for different load-bearing solutions. There has been vast increase in usage of different composite materials for structural applications. For instance in light bridge deck applications under the last ten years different composite and hybrid materials have replaced some of the more traditional materials, such as wood, steel and concrete. Their main advantages compared to other materials are good stiffness-to-weight –ratio, excellent chemical resistance and reduced maintenance costs. In some applications, such as wind power blades, composite materials are the only feasible material group which can be used taking into consideration cost constraints.

In the long term composite materials can be cheaper because of the ease of maintenance even though their purchasing price is higher when compared to traditional materials. There is a great number of different commercial products which apply either composite or hybrid materials. The second part of the thesis is about these products and comparison of them.

The last part of the thesis is the practical chapter. Pultruded glass-fiber reinforced polyester profile was ordered from a large Finnish pultrusion company Exel Composites Oyj. The pultruded profiles came from Belgium and they were in 6 meter long profiles. A large composite panel was to be constructed from the profiles. The bars had to be cut and adhesively bonded together to make the panel. The panel was 2 meters long, half a meter wide and 20 centimeters high. Panel was tested for its strength and the results showed that the panel has very good properties.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiön rahoittamalla stipendillä. Työ toteutettiin elokuun 2010 ja huhtikuun 2011 välisenä aikana.

Työn valmistumista eri vaiheissaan ovat auttaneet useat henkilöt. Profiilien sahauksissa ja jysynnöistä sekä hyvistä vinkeistä kiitokset Jyri Öhrlingille. Liimaukseen liittyvistä asioista haluan kiittää Terpol Oy:n Matti Suomista ja Materiaaliopin laitokselta Taneli Lahtista sekä vetokokeissa avustanutta Kauko Östmania. Pultruusioprofiilien liimaukseen liittyvissä asioissa haluan kiittää Kim Sjödahlia Exel Composites Oyj:tä. Suurkiitokset haluan antaa myös apumiehenä liimauksissa ja sahauksissa olleelle Mikko Saloselle. Erityiskiitokset aineiston haussa ja käytännön asioissa osoitan ohjaajalleni Olli Orellille sekä tarkastaja Jyrki Vuoriselle.

Tämän raskaan prosessin lopuksi haluan kiittää myös perhettäni sekä Teekkarikuoron, Materiaali-insinöörikillan että muita Tampereen teknillisen yliopiston ylioppilaskunnan ihmisiä; ilman teitä tämä työ ei olisi valmistunut.

Tampereella, 8. päivä huhtikuuta 2011,

Johannes Komulainen

SISÄLLYS

1.	Johdanto.....	1
2.	Suuret rakenteet	2
2.1.	Sillat.....	2
2.2.	Laivat ja veneet	4
2.3.	Lentokoneet.....	5
2.4.	Tuulivoimalat	7
3.	Valmistusmenetelmät	8
3.1.	Pultruusio	8
3.1.1.	Menetelmän kuvaus	8
3.1.2.	Edut ja haitat	9
3.2.	Alipaineinjektio	10
3.2.1.	Menetelmän kuvaus	10
3.2.2.	Edut ja haitat	10
3.3.	Kerroslevy ja sen valmistus	11
3.3.1.	Menetelmän kuvaus	11
3.3.2.	Edut ja haitat	11
4.	Tuotevaihtoehdot	12
4.1.	Kaupallisia tuotteita.....	12
4.1.1.	DuraSpan 766.....	12
4.1.2.	SuperFiberSPAN	13
4.1.3.	FBD600 Asset Bridge Deck.....	14
4.1.4.	36” x 18” Extren DWB Beam	15
4.1.5.	Sandwich Plate System.....	16
4.2.	Yksittäiset ratkaisut	17
4.2.1.	Utrechtin silta	17
4.2.2.	Komposiittisilta sotilaskäyttöön	18
4.3.	Vertailu	18
5.	Liimaus	20
5.1.	Komposiitti-komposiitti -liitokset	20
5.2.	Komposiitti-teräs –liitokset.....	21
5.3.	Muut liitostekniikat	21
5.4.	Raskaisiin käyttökohteisiin soveltuvat liimatyypit	22
5.4.1.	Epoksit	22
5.4.2.	Polyesterit.....	22
5.4.3.	Polyuretaanit	22
5.4.4.	Akryylit	23
5.4.5.	Hybridiliimat	23
6.	Testausmenetelmät	24
6.1.	Vetokoe.....	24
6.2.	Kolmipistetaivutus.....	25

6.3. Pudotuskoe.....	26
7. Testaus.....	27
7.1. Materiaalien valinta	28
7.2. Profiilien sahaaminen	28
7.3. Liimojen testaus	29
7.3.1. Näytekappaleiden valmistus.....	29
7.3.2. Crestabond -näytteiden valmistus.....	30
7.3.3. Araldite 2014- näytteiden valmistus	31
7.3.4. Vetokoe Crestabondille.....	32
7.3.5. Vetokoe Aralditelle.....	32
7.3.6. Liimojen vertailu vetokokeiden perusteella	33
7.4. Iso paneeli	34
7.4.1. Hionta.....	34
7.4.2. Paneelin osien liimaus	34
7.5. Ison paneelin testaus.....	37
7.5.1. Ensimmäinen testaus	37
7.5.2. Toinen testaus.....	39
7.5.3. Testitulokset	40
7.6. Pintapaneeli	41
7.6.1. Käytettävä materiaali	41
7.6.2. Pintapaneelin testaus.....	42
7.6.3. Testitulokset	45
8. Johtopäätökset.....	46
Lähteet.....	48
Liite 1. Sahattujen liimanäytteiden mitat	50
Liite 2. Liimanäytesauvojen mitat, murtokuormat sekä vetoleikkauslujuudet	51
Liite 3. Sahausohje.....	52
Liite 4. Hiontaohje	53
Liite 5. Liimausohje	54
Liite 6. Liimaukseen liittyvä data	56
Liite 7. Pudotustestauksen data	57

LYHENTEET

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CF	Hiilikuitu (eng. Carbon fiber)
CFRP	Hiilikuidulla lujitettu polymeerikomposiitti (eng. Carbon fiber reinforced polymer composite)
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
GF	Lasikuitu (eng. Glass fiber)
GLARE	Glass-reinforced aluminium
GFRP	Lasikuidulla lujitettu polymeerikomposiitti (eng. Glass fiber polymer composite)
GRP	Katso: GFRP (eng. Glass-reinforced polymer composite)
PES	Polyesteri
PIR	Polyisosyanuraatti
PUR	Polyuretaani
SCRIMP	Seeman Composite Resin Infusion Molding Process
SPS	Sandwich Panel System
VE	Vinyyliesteri

TERMIT

Adhesiivinen murtuma	Liimaliitoksissa esiintyvä murtumatyyppi, jossa murtuma tapahtuu liitoksen rajapinnoissa. Tarkoittaa yleensä epäonnistunutta liimaliitosta.
Hybridiliima	Kahdesta tai useammasta liimahartsista koostuva liima.
Koheesivinen murtuma	Liimauksen yhteydessä esiintyvä murtumatyyppi, jossa murtuma tapahtuu liimasauman keskikohtaa pitkin. Liimaliitoksissa tämä on toivottava murtumatyyppi.
Komposiitti	Kahden tai useamman materiaalin yhdistelmä, jossa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole sulaneet tai lienneet toisiinsa.(1)
Kuitu	Ohut, lankamainen materiaali.
Matriisi	Komposiittituotteissa kuidut yhteen sitova materiaali, joka on yleensä jokin kertamuoviharts.
Pultrusio	Polymeerikomposiittien tuotantomenetelmä, jossa kuidut vedetään hartsimatriisiin läpi.
Suulakeveto	Katso: pultrusio.

1. JOHDANTO

Erilaisten hybridimateriaalien sekä komposiittien käyttö suuressa mittakaavassa on yleistynyt 2000-luvun aikana, kun rakenteiden lujuuden ja keveyden suhdetta on haluttu parantaa. Tässä työssä tutkittiin olemassa olevia ratkaisuja suurten rakenteiden osalta. Perinteisten kuitulujitettujen komposiittien lisäksi kiinnostuksen kohteena olivat myös uudet hybridimateriaalit. Tavoitteena oli löytää kaupallisesti järkevä materiaali, jonka ominaisuudet vastaavat rakenneteräksiä. Samalla rakenteen tuli olla sekä helposti huollettava, kemiallisesti kestävä että mahdollisimman kevyt.

Sekä komposiittien että hybridimateriaalien yksiselitteinen luonnehtiminen on hankalaa. Tämän työn puitteissa komposiittimateriaaleilla tarkoitetaan lähinnä kuitulujitettuja polymeerikomposiitteja. Hybridimateriaaleilla taas tarkoitetaan erilaisia kerroslevy- ja laminaattiratkaisuja, joissa on mukana muovi- ja metallikomponentteja. Hybridimateriaaleina pidetään myös esimerkiksi erilaisia komposiittien ja teräksen yhdistelmiä.

Näiden lisäksi on tutkittu mahdollisia liitostapoja, joilla suuria komposiittirakenteita voidaan liittää toisiinsa. Liitoksia on tutkittu kahdesta eri näkökulmasta. Ensin on tutkittu komposiittien välisiä liitoksia ja tämän lisäksi komposiittien liittämistä teräsrakenteeseen.

Työn loppuosa koostuu testauksesta. Siinä on esitetty pultruusioprofiileista liimaamalla valmistetun paneelin materiaalin valinta, valmistusvaiheet sekä paneeliin liittyvät testaukset. Tämän lisäksi on testattu paneelin päälle tulevan pintapaneelin iskunkestävyyttä.

2. SUURET RAKENTEET

Tässä kappaleessa on käsitelty erilaisia tuotteita, joissa komposiittiset rakenteet ovat osoittautuneet perinteisiä ratkaisuja paremmiksi materiaalivevaihtoehtoiksi. Yleisesti ottaen komposiittisten tuotteiden paino on huomattavasti alhaisempi kuin vastaavien teräs- tai alumiinituotteiden. Polymeerikomposiiteilla on yleisesti huomattavasti parempi kemiallinen kestävyys kuin esimerkiksi teräksellä, jolloin korroosionsuojausta ei tarvitse yleensä erikseen toteuttaa. Tämän työn puitteissa on keskitytty siltoihin ja niiden kansiin, mutta näiden lisäksi on käsitelty myös muita tuotteita, joissa käytetään komposiitti- ja hybridirakenteita.

2.1. Sillat

Silloissa on käytetty jo pitkään komposiittirakennetta, jossa lujitteena on teräs ja matriisina betoni. Kuitenkin on havaittu, että pitkällä tähtäimellä betonimatriisiset sillat haurastuvat ja niiden huollon tarve kasvaa vuosi vuodelta. Niihin verrattuna komposiittisilloilla on mahdollista saada jopa kolminkertainen käyttöikä (2). Terässiltojen tapauksessa huollon tulee olla säännöllistä, jotta korroosion vaikutus saadaan minimoitua. Komposiiteilla on odotettavissa kymmenien vuosien käyttöaika, jonka aikana ne tarvitsevat vain vähäisen määrän huoltoa. Tämän lisäksi betonisia kansia korvattaessa on mahdollista saavuttaa jopa 80 prosentin painonsäästö (3). Toisaalta sekä teräs- että teräsbetonisillat ovat vanhoja tuotteita ja niiden käyttäytyminen tunnetaan suhteellisen hyvin, kun niitä verrataan markkinoilla vain vähän aikaa olleisiin komposiittisiltoihin. Joitain siltakomposiittipaneeleja on kuitenkin jo testattu ja tällaisista löytyy esimerkkejä lähteestä (4).

Ensimmäinen käyttöön otettu polymeerikomposiittinen kävelysilta tehtiin Tel Avivin Israeliin jo vuonna 1975 (2) ja nykyisin erilaisia siltoja ja niiden kansia löytyy ympäri maailman joitakin satoja (5). Näistä suurin osa on kevyitä siltoja ja erityisesti niiden kansia, mutta myös raskaampia liikenne- ja rautatiesiltoja on käytössä. On olemassa myös ratkaisuja, joissa sillan kantavat rakenteet on korvattu kokonaan polymeerikomposiittiratkaisuilla. Tällaisesta on esimerkki kappaleessa 4.1.4. Vaikka yleisesti ottaen kuitulujitettujen komposiittisiltojen ominaisuudet ovat perinteisiä ratkaisuja parempia, suurimpana yksittäisenä ongelmana on niiden kallis alkuinvestointihinta. Pitkällä aikavälillä kuitulujitetut komposiitit voivat kuitenkin tulla edullisemmiksi kuin perinteiset siltamateriaalit, huolimatta kalliimmasta alkuinvestointihinnasta (2). Toisaalta kokemuksia pitkältä aikaväliltä on melko vähän. Euroopan ensimmäinen raskaalle liikenteelle suunniteltu täysin komposiittinen silta

avattiin vuonna 2002 Shrivenhamiin Englantiin. Sillan pituus on 10 metriä ja leveys 6,8 metriä (6).

Polymeerikomposiittisissa silloissa suurimpia etuja ovat keveys, kemiallinen kestävyys, vähäinen huollon tarve, helppo asentaminen paikan päällä sekä tarvittaessa siirtäminen. Aikaisemmin komposiittien käytössä oli riskinä niiden heikot palo-ominaisuudet, mutta nykyään komposiittimatriiseista voidaan tehdä tarvittaessa palonkestäviä. Lisäksi komposiittiset sillat on mahdollista valmistaa hyvin pitkälle valmiiksi ennen asennusta ja siten nopeuttaa sillan käyttöönottoa. Friedbergissa Saksassa asennettiin 27 metriä pitkä, teräsrakenteeseen liitetystä, pultruusiolla valmistetusta profiilista valmistettu valtatiesilta kerralla paikalleen. Näin säästettiin noin kolmen viikon työ perinteisiin materiaaleihin verrattuna (7). Silta on esitetty kuvassa 2.1 ja profiilista löytyy lisätietoa kappaleesta 4.1.3.



Kuva 2.1. Friedbergin silta ennen asennusta. Kuva Fiberline Composites.

Käytettävissä komposiittisiltaratkaisuihin on käytännössä aina pinnoite olemassa olevan rakenteen päällä, sillä polymeerikomposiitit eivät kestä rengasajoneuvojen aiheuttamaa kulumista ilman pinnoitetta. Erilaisia pinnoitevaihtoehtoja on lukuisasti eri käyttötarkoituksia varten. Kevyissä silloissa voidaan käyttää esimerkiksi uretaanielastomeeripinnoitteita. Tällainen ratkaisu löytyy esimerkiksi kappaleesta 4.2.2. Raskaammissa sovelluksissa pinnoite voi olla esimerkiksi polymeeribetonia tai asfalttia. Polymeeribetonin käyttö on lisääntymässä, sillä sen avulla on mahdollista polymeroida betoni komposiitin pinnan kanssa ja saavuttaa siten parempi adheesio (3). Pinnoitteiden käyttämiselle voidaan kulutuksenkeston lisäksi löytää myös muita syitä. Pinnoitemateriaali voi olla komposiittimateriaalia halvempaa, jolloin sen uusiminen tarvittaessa on edullista.

Lujitemateriaalina komposiittisilloissa käytetään sekä hiili- että lasikuitua, mutta myös esimerkiksi aramidikuituja käytetään. Lasikuitu on edullisuutensa vuoksi yleisin vaihtoehto. Valmistustekniikkoja on useita, tärkeimpinä alipaineinjektio ja pultruusio. Hybridirakenteissa erilaiset kerroslevyt ovat myös vaihtoehtoja. Siltojen valmistuksessa

käytettävät tuotteet ovat suurikokoisia ja molemmilla näistä tekniikoista suurienkin tuotteiden valmistus on mahdollista.

Komposiittimateriaalien lisäksi myös hybridimateriaaleista voidaan valmistaa esimerkiksi siltojen kansia. Näissä suurin etu on käsittelyn helppous. Hybridimateriaaleja, joissa on terästä, voidaan käsitellä teräksiä vastaavasti ja niitä voidaan muun muassa hitsata ja työstää teräksiä vastaavasti. Esimerkki hybridimateriaalisillasta on Kanadassa vuonna 2003 käyttöön otettu Shenleyn silta. Sillan kansipaneeli valmistettiin kymmenestä paneelistä ja sen kokonaispituus on noin 22 metriä (8). Silta on esitetty kuvassa 2.2 ja lisätietoa materiaalista löytyy kappaleesta 4.1.5.



Kuva 2.2. Sandwich plate system -materiaalista valmistettu sillan kansi, kuva Intelligent Engineering

2.2. Laivat ja veneet

Veneissä komposiittien käyttö yleistyi toisen maailmansodan jälkeen, kun havaittiin lasikuituisten veneiden keveys sekä helppo huollettavuus (9). Aluksi komposiitteja käytettiin pienissä veneissä ja maihinnousualuksissa, mutta vuosien myötä komposiitteja hyödyntävien aluksien koko on kasvanut. Suurimmat täysin komposiittiset merivoimien käytössä olevat laivat ovat noin 80 – 90 metriä pitkiä (9). Nykyisin sekä vene- että laivateollisuus on suuri komposiittisten raaka-aineiden käyttäjä.

Korvattaessa laivoissa teräsrakenteita komposiittisilla paino kevenee huomattavasti. Tutkimusten mukaan esimerkiksi partioveneiden rakenteessa on mahdollista saavuttaa komposiittien avulla noin 36 prosentin painonsäästö (9). Erikoistapauksissa on mahdollista saavuttaa jopa 75 prosentin painonsäästö perinteisiin ratkaisuihin verrattuna (10). Rakenteen keventäminen voi mahdollistaa suuremman hyötykuorman, polttoaineen säästön sekä suuremmat toiminta-alueet (9). Hyvin suuria laivoja valmistettaessa kuitulujitettujen komposiittien ongelma on komposiittien luonteenomainen taipuminen, joka vaikeuttaa täysin jäykkien runkorakenteiden valmistusta (9). Tilanteessa, jossa teräsrakennetta ei ole mahdollista korvata täysin

komposiiteilla, voidaan laivan muita osia, kuten savupiippuja, mastoja ja kansia valmistaa komposiiteista tai erilaisista hybridimateriaaleista.

Esimerkkinä täysin komposiittisesta laivarakenteesta on Ruotsissa vuonna 2000 valmistettu ensimmäinen Visby-luokan alus. Alus on hiilikuitulujitettua komposiittia ja siinä on alipaineinjektion avulla valmistettu kerroslevyrakenne. Alus on esitetty kuvassa 2.3. (10)



Kuva 2.3. Ruotsalainen Visby-luokan alus, kuva Kockums AB

Laivateollisuuden käyttämä materiaaliskaala on hyvin laaja. Sotilasteollisuus käyttää hiilikuidulla lujitettuja veneitä ja laivoja, joiden paino on hyvin alhainen ja magneettiset ominaisuudet mahdollistavat miinoitettujen vesialueiden läpikulkemisen. Tästä syystä suurin osa eri maiden merivoimien käytössä olevista komposiittilaivoista on miinanraivausaluksia. Siviilikäytössä veneteollisuus käyttää yleisesti lasikuitulujitettuja rakenteita, mutta myös paikallisia hiilikuitulujituksia käytetään ja (11). Kalleissa veneissä ja jahdeissa voidaan käyttää myös täysin hiilikuituisia rakenteita.

2.3. Lentokoneet

Lentokoneissa käytettävät materiaalit ovat optimaalisesti mahdollisimman kevyitä suhteessa jäykkyyteen ja tästä johtuen lentokoneiteollisuus on suuri hiilikuitulujitettujen komposiittien käyttäjä. Lentokoneiden painonsäästö näkyy suoraan polttoaineen kulutuksessa ja saatavat painonsäästöt laskevat kulutusta siinä määrin, että investointihetkellä tuotteen hinta saa olla hyvinkin kallis.

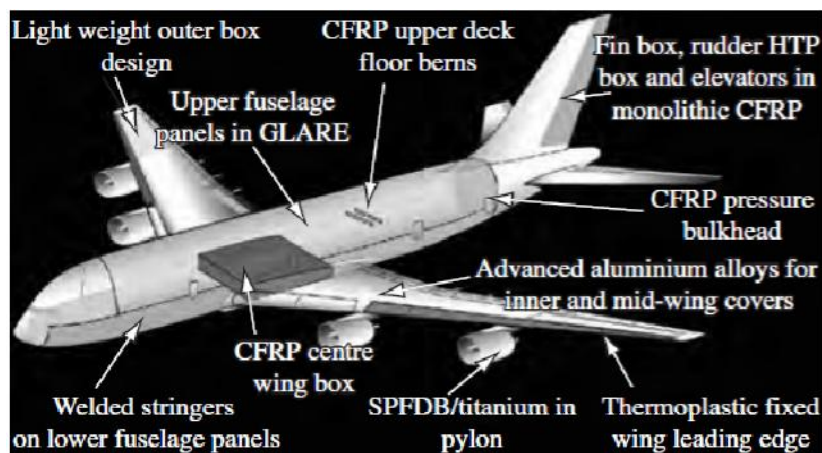
Sotilaskäytössä lentokoneiden hiilikuidulla lujitetut komposiittiset rakenteet ovat olleet käytössä 1970-luvulta lähtien yleisiä (1). Näissä keveyden lisäksi komposiittisia rakenteita käytettäessä häiveominaisuuksia pystytään parantamaan. Pienkoneissa ensimmäiset kantavat lasikuiturakenteet otettiin käyttöön jo 1950-luvulla ja nykyään komposiittimateriaalit ovat niissä yleisiä (1).

Moderneissa siviililentokoneissa huomattavan suuri osa komponenteista on komposiittisia. Esimerkiksi Boeingin uudesta 787 -matkustajalentokoneesta noin puolet painosta on hiilikuitulujitettua komposiittimateriaalia (12). Esimerkkinä suurista yksittäisistä osista ovat Airbus 380:n lattiapaneelit, jotka on valmistettu pultruusiolla. Yksittäisen lattiapaneelin pituus on noin seitsemän metriä. Suurimpia yksittäisiä komposiittiosia edustaa kuvassa 2.4 Airbus 400M:n rahtiluukun ramppi, jonka mitat ovat 4 metriä kertaa 8 metriä ja se on valmistettu EADS:n patentoimalla alipaineinjektion erikoissovelluksella VAP eli Vacuum Assisted Process (13).



Kuva 2.4. Airbus 400M:n rahtiramppi (14)

Kuitulujitettujen komposiittien lisäksi myös erilaisia hybridimateriaaleja käytetään lentoteollisuudessa. Esimerkki tällaisesta on Glare, joka on alumiinista ja yhdensuuntaisista lasikuitulujitteista valmistettu laminaattimateriaali. Glarea käytetään esimerkiksi Airbus 380:n ulkorakenteessa (15). Kuvassa 2.5 on esitetty Airbus 380:n eri materiaalien käyttökohdat pääpiirteittäin, jossa CFRP tarkoittaa hiilikuidulla lujitettua komposiittia ja SPFDB erikoistitaaniseosta.



Kuva 2.5. Airbus 380:n metalli- ja kuitulujitetut osat (15)

2.4. Tuulivoimalat

Tuulivoimaloiden lavat ovat tyypillisiä käyttökohteita moderneille komposiiteille. Kun tuulivoimaloiden valmistus standardoitui, sarjatuotannossa lapamateriaaleiksi vakiintuivat komposiitit. Lapojen pituus voi olla kymmenien metrien luokkaa, jolloin niiden paino perinteisillä materiaaleilla nousee liian korkeaksi. Ainoastaan lyhyitä lappoja valmistetaan joko teräksestä tai alumiinista.



Kuva 2.6. Tuulivoimalan lapa kuormitustestauksessa (16)

Tuulivoimaloiden valmistus on tällä hetkellä yksi suurimmista komposiittien käyttäjistä. Esimerkiksi vuonna 2007 valmistettiin lähes 50 000 keskimäärin 36 metrin mittaista tuulivoimalan lapaa, joista jokaiseen tarvitaan noin 5000 kiloa komposiittimateriaaleja (2). Kuvassa 2.7 on esitetty tyypillinen kolmen megawatin voimalan lapa, joka odottaa asennustaan. Lavan pituus on noin 50 metriä.



Kuva 2.7. Kolmen megawatin voimalan lapa odottamassa asennusta, kuva WinWind

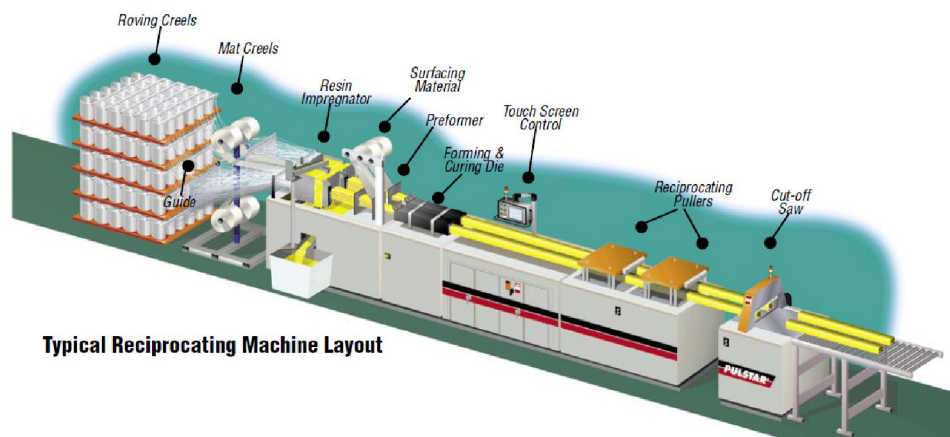
Lappoja tehdään tyypillisesti joko lasikuidusta tai hiilikuidusta, mutta myös erilaisia edellä mainittujen yhdistelmiä käytetään. Pituuden kasvaessa jäykkyyden hallinta muuttuu yhä olennaisemmaksi ja tästä syystä hyvin pitkissä lavoissa lasikuitua on korvattu hiilikuidulla (12).

3. VALMISTUSMENETELMÄT

Komposiittien valmistusmenetelmiä on useita, mutta suurten yksittäistuotteiden valmistuksessa käytetään lähinnä pultruusiota ja paineinjektiotekniikoita. Tässä kappaleessa on käsitelty tärkeimmät työn puitteissa esiintyvät rakennekomposiittien valmistusmenetelmät sekä lyhyesti kerroslevyrakenteesta.

3.1. Pultruusio

3.1.1. Menetelmän kuvaus



Kuva 3.1. Tyypillinen pultruusiolaitteisto, kuva Strongwell

Pultruusiossa keloilta vedetään kuitua, joka kostutetaan hartsimateriaalissa. Kuidut voivat olla joko yksittäisinä kuituina, mattoina tai erilaisina yhdistelminä. Saatu kuitumatriisiseos vedetään kuumennetun muotin läpi, jolloin saadaan valmistettua halutun muotoista profiilia. Tyypillisinä matriiseina ovat polyesteri ja vinyyliesteri, mutta myös muita matriiseja voidaan käyttää. Kuituina käytetään tyypillisesti lasi- tai hiilikuituja, mutta myös muita kuituja voidaan käyttää. Pultruusiolla on mahdollista päästä hyvin korkeisiin kuituprosentteihin, jopa 70 – 80 tilavuusprosenttia, mutta käytännössä kuitujen määrä on yleensä hieman alhaisempi. Liian suurilla kuituprosenteilla on mahdollista, että osa kuiduista ei kastu hartsissa kokonaan. Valmistusnopeudet ovat tyypillisesti luokkaa 0,5 – 2 metriä minuutissa, mutta pienillä profiileilla nopeutta on mahdollista myös nostaa huomattavasti (11).

3.1.2. Edut ja haitat

Pultruusiossa on useita hyviä puolia. Siinä saadaan valmistettua suuria kappaleita ja määriä suhteellisen nopeasti. Kumpikaan näistä ominaisuuksista ei ole komposiittituotteiden valmistuksessa itsestäänselvyys. Tällöin massatuotannossa olevat tuotteet ovat kustannustehokkaita. Profiili voi olla samalla dimensioiltaan hyvinkin suuri ja monimutkainen vaikuttamatta kuitenkaan suuresti valmistusnopeuteen. Pultruusion etuna muihin komposiittituotteiden valmistusmenetelmiin on suhteellisen hyvien toleranssien aikaansaaminen (11).

Koska pultruusion tapauksessa kyseessä on kaksiulotteinen muotti, muotoa voidaan säätää kolmessa ulottuvuudessa vain rajoitetusti. Tämän lisäksi pultruusiossa käytettävät tuotantolaitteet ja muotit ovat huomattavan kalliita, jolloin yksittäistuotteiden valmistus tulee hyvin kalliiksi. Tämän takia pultruusio ei välttämättä sovellu pienien tuotantomäärien valmistusmenetelmäksi. Pultruusiota voidaan verrata esimerkiksi alumiinin valmistuksessa käytettävään pursotukseen. Suurimpana erona on muotin koko, joka pultruusiossa voi olla jopa metrin pituinen, kun alumiinin valmistuksessa muotti on lyhyt. Tämä johtuu siitä, että pultruusioprofiilia valmistettaessa tuotteen on kovetuttava täysin muotin sisällä hyvälaatuisen tuotteen aikaansaamiseksi.

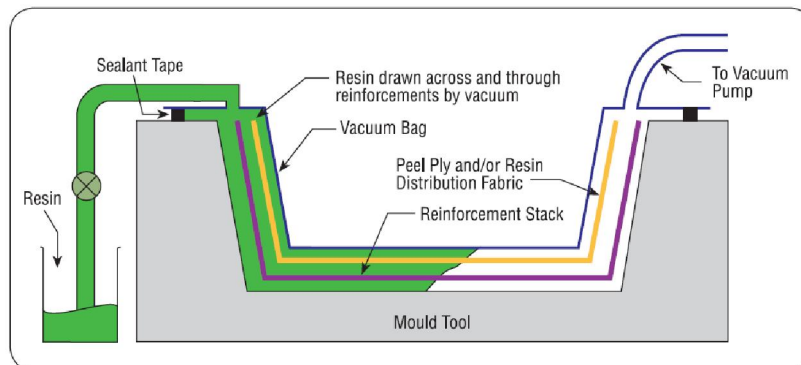
Suuria ja erityisesti pitkiä kappaleita valmistettaessa pultruusio on hyvä tekniikka. Sillä voidaan tarvittaessa valmistaa teoriassa rajoittamattoman pitkiä ja samalla huomattavan leveitä tuotteita. Valmiit profiilit on mahdollista suunnitella siten, että ne on helppo myös liittää toisiinsa eri suunnissa.

Pultruusiolle on olemassa oleva standardi EN 13706. Standardissa on määritelty minimivaatimukset pultruusiotuotteiden lujuudelle ja muille olennaisille ominaisuuksille. Tämä helpottaa pultruusiolla valmistettavien tuotteiden suunnittelua.

3.2. Alipaineinjektio

Erilaisia paineinjektiotekniikoita on runsaasti ja tekniikkojen varsinaiset erot saattavat monesti olla hyvin pieniä. Tämän työn puitteissa on käsitelty ainoastaan alipaineinjektiota, josta on myös itsestään olemassa erilaisia teknisiä ratkaisutaperoja. Lisätietoja erilaisista paine- ja alipainetekniikoista löytyy lähteestä (17) .

3.2.1. Menetelmän kuvaus



Kuva 3.2. Alipaineinjection suuntaa-antava kaavakuva, kuva Gurit

Alipaineinjektiossa avoimeen muottiin asetetaan kuidut sekä mahdolliset ydinmateriaalit. Toisena muottipintana toimii joko alipainekalvo tai joustava muottipuolisko. Tämän jälkeen pintojen väliin muodostetaan alipaine, joka vetää erillisestä astiasta letkulla hartsin, joka kostuttaa kuidut. Kun kaikki kuidut on kostutettu, tuotteen annetaan kuivua ja tämän jälkeen tuote on valmis. Samoin kuin pultruusiossa, kuitujen tilavuusprosentti on korkea, noin 60 tilavuusprosentin luokkaa. Tyypillinen valmistusnopeus on noin 3 – 6 kilogrammaa tunnissa (11).

3.2.2. Edut ja haitat

Alipaineinjektio soveltuu erityisen hyvin valmistusmenetelmäksi silloin, kun halutaan valmistaa suuria, yksittäisiä tuotteita, joissa on monimutkaisia muotoja. Mittoja ei ole periaatteessa rajattu lainkaan ja tästä syystä esimerkiksi kokonaisia veneitä voidaan valmistaa tällä tekniikalla kerralla valmiiksi. Muottimateriaalin valinta on vapaa ja käytössä onkin paljon esimerkiksi puita muotteja. Saatavien tuotteiden laatu on yleisesti ottaen melko hyvä. Alipaineinjektiolla valmistettuja tuotteita voidaan käyttää myös kerroslevyjen valmistuksessa.

Kuitujen suuntaus voidaan toteuttaa täysin vapaasti ja erilaisten täytemateriaalien käyttäminen on samalla myös mahdollista. Matriisi voidaan samoin valita hyvin vapaasti.

Alipaineinjektiossa muodostuu huomattavan suuri määrä jätettä, kun valmistetaan suuria kappaleita. Ongelmana on myös se, että täydellistä kuitujen kostumista ei välttämättä saavuteta, jolloin tuotteen laatu voi olla huono. Tämän lisäksi kuidut saattavat päästä liikkumaan injektion aikana.

3.3. Kerroslevy ja sen valmistus

Kerroslevyllä tarkoitetaan yksinkertaisimmillaan kahden pintalevyn ja niiden välissä olevan täytemateriaalin muodostamaa yhdistelmää. Käytännössä erilaisia pintalevyjä voi olla useita ja täytemateriaaleja voi olla samoin useita erilaisia. Kerroslevyt voivat olla joko komposiittisia tai erilaisia hybridirakenteita. Komposiittisesta kerroslevyratkaisusta löytyy esimerkki kappaleesta 4.1.2. ja hybridikerroslevystä kappaleesta 4.1.5.

3.3.1. Menetelmän kuvaus

Kerroslevyt voidaan tyypillisesti valmistaa kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä tapauksessa valmiit levyt ja valmiit täytemateriaalit kootaan tuotteeksi esimerkiksi liimaamalla. Toinen vaihtoehto on antaa täytemateriaalin reagoida valmistuksen aikana, jolloin se liimautuu pintalevyihin valmistuksen aikana. Tyypillinen reagoiva täytemateriaali on polyuretaani. (11)

3.3.2. Edut ja haitat

Kerroslevytekniikalla saadaan valmistettua hyvin kevyitä rakenteita ja käytännössä mitä tahansa erilaisia materiaaliyhdistelmiä voidaan käyttää. Hyvin suuria tuotteita valmistettaessa ongelmaksi voi muodostua riittävän hyvän adheesion aikaansaaminen pintojen välille. Reagoivan täytemateriaalin tapauksessa valmistustapa tulee suunnitella hyvin.

4. TUOTEVAIHTOEHDOT

Tässä kappaleessa on tutkittu ympäri maailman kaupallisesti käytössä olevia suuria komposiittituotteita. Kappale on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä on tutkittu suoraan valmistajalta saatavia tuotteita. Toinen osa sisältää yksittäisiä tuotteita, jollaisia työn puitteissa tutkittavista materiaaleista on valmistettu. Lopussa on vertailtu kaupallisia tuotevaihtoehtoja toisiinsa.

4.1. Kaupallisia tuotteita

4.1.1. DuraSpan 766



Kuva 4.1 DuraSpan-paneeli taivutuskokeessa, kuva Martin Marietta

DuraSpan on yhdysvaltalaisen Martin Marietta- yrityksen valmistama siltojen kansipaneelimateriaali. Paneelit ovat pultruusiolla valmistettua lasikuitulujitettua polyesteriä. Pultruoidut putket on liimattu toisiinsa polyuretaaniliimalla. Siltoja valmistettaessa kansipaneelit tyypillisesti päällystetään joko betonilla tai asfaltilla kulutuskestävyyttä varten.

Tyypillinen kansipaneelin koko on paksuudeltaan 195 millimetriä ja leveydeltään 200 – 250 millimetriä. Sillan tukipalkkien välinen pituus on tyypillisesti noin kolme metriä, mutta valmistustekniikka mahdollistaa pidemmänkin jännevälin. Valmiin kansipaneelin massa on noin 93 kg/m².

Paneelit on suunniteltu Yhdysvaltojen tiehallinnon AASHTO HS25-standardin mukaisesti. HS-25- standardissa vaatimuksena on kolmiakselisen kuorma-auton kantavuus, jossa kuormituksen yhteispaino on noin 40 000 kilogrammaa. Valmistajalla on myös vastaava, mutta kevyempi tuote DuraSpan 500. Erona on tuotteen korkeus ja tätä kautta kuormankantavuus. Myös DuraSpan 500 on suunniteltu AASHTO HS25-standardin mukaisesti.

4.1.2. SuperFiberSPAN



Kuva 4.2 SuperFiberSpanin rakenne, kuva Composite Advantage

SuperFiberSPAN on yhdysvaltalaisen Composite Advantagen tuote, jota käytetään siltojen valmistamiseen. Tuotteet ovat kerroslevyrakenteita, joiden pinta on lasikuitulujitettua vinyyliesteriä ja sisäosa polyisosyanuraattivaahtoa eli PIR:ä. Pintalevyjen valmistustekniikkana on paineinjektio ja lopullinen kokoonpano on kerroslevymäinen.

SuperFiberSPAN voidaan valmistaa tarvittaessa 15 metrin pituisena, mutta tyypillisesti yksittäisen tuotteen mitat ovat pituudeltaan 6700 millimetriä ja korkeudeltaan 550 millimetriä. Leveys on aina 2300 millimetriä.



Kuva 4.3 SuperFiberSpan asennusvaiheessa, kuva Composite Advantage

Tuote on saatavilla AASHTO:n standardien H10, HS20 tai HS25- standardien mukaisesti suunniteltuna. SuperFiberSpan kantaa rakennetta siten, että sen alle ei tarvita lujitepalkkeja. Tuotteen korkeus vaihtelee vaaditun kantokyvyn mukaisesti.

Samalla valmistajalla on myös sisartuote FiberSPAN, joka on rakenteeltaan kevyempi. Sitä käytetään tukipalkkien päällä olevana kansirakenteena. Sen rakenne on vastaava kuin SuperFiberSPAN:ssa.

4.1.3. FBD600 Asset Bridge Deck



Kuva 4.4 Poikkileikkaus Asset-profiilista, kuva Fiberline Composites

Asset on tanskalaisen Fiberline Composites- yrityksen valmistama siltojen kansimateriaali. Kolmionmallinen tuote valmistetaan pultruusiolla lasikuitulujitetusta polyesteristä. Paneelit liitetään toisiinsa epoksilla liimaamalla. Siltoja valmistettaessa käytössä on myös pelkän Assetin lisäksi myös muita pultruusiolla valmistettuja tuotteita. Kansipaneelin kulutuspinna käytetään polymeeribetonia tai asfalttia, joka lisätään kannen päälle asennusvaiheessa.



Kuva 4.5 Asset asennusvaiheessa, kuva Fiberline Composites

Tuotteen pituutta ei ole periaatteessa rajoitettu, mutta leveys on tyypillisesti noin 1000 millimetriä ja korkeus 225 millimetriä. Materiaalin paino on noin 100 kilogrammaa neliömetriä kohti. Kyseisen materiaalin lisäksi valmistajalla on myös kaksi vastaavaa, mutta kevyempää siltapaneelivaihtoehtoa, FBD450 Clap sekä FBD300. Näistä ensimmäinen soveltuu valmistajan mukaan esimerkiksi sotilassilloiksi ja jälkimmäinen kevyiden siltojen valmistukseen. Kevyemmissä versioissa materiaalin korkeus on matalampi ja poikkileikkaus hieman erilainen, mutta muuten ominaisuudet ovat vastaavat.

4.1.4. 36" x 18" Extren DWB Beam



Kuva 4.6 Extren DWB, kuva Strongwell

Extren DWB on yhdysvaltalaisen Strongwellin pultruusiolla valmistama palkkityyppinen, poikkeuksellisen suuri komposiittituote. Tuotetta käytetään teräksisten I-palkkien korvaajina silloissa ja tällaisesta löytyy esimerkki kuvassa 4.7. Tuote on valmistettu vinyyliesteristä, jossa on lujitteena sekä lasi- että hiilikuitua. Yhteensä kuitujen määrä tuotteen kokonaistilavuudesta on noin 55 %.



Kuva 4.7. Extren tukipalkkirakenteena, kuva Strongwell

Palkin mitat ovat korkeudeltaan 910 millimetriä ja leveydeltään 460 millimetriä. Palkin pituutta ei valmistustekniikasta johtuen ole rajoitettu, mutta käytännössä tuotetta on tuettava noin 18 metrin välein. Massaa palkille tulee metriä kohden 104 kilogrammaa. Muihin vastaaviin pultruusiotuotteisiin huomattavaa on erityisesti se, että Extren on suunniteltu käytettäväksi pystyasennossa ja on siten lähes metrin korkea.

4.1.5. Sandwich Plate System



Kuva 4.8. Sandwich Plate System ja sen rakenne (18)

Sandwich-levyllä tarkoitetaan kerroslevyratkaisua, jossa kahden, kuormaa kantavan pintalevyn väliin on laitettu kevyempää materiaalia. Tästä tehty sovellus Sandwich Plate System eli SPS on englantilaisen Intelligent Engineering- yrityksen patentoima hybridimateriaali, jonka alkuperäinen käyttötarkoitus oli laivojen sisäkansien pintojen korjausmateriaalina (8). Ensimmäiset sovellukset otettiin käyttöön vuosina 1999 ja 2000. Laivojen sisäpintojen lisäksi siitä on valmistettu myös muun muassa siltojen kansia, jollaisesta löytyy esimerkki kuvasta 2.2 sivulta 4.

Materiaali koostuu kahden ohuen, pintalevyinä toimivien teräslevyjen väliin vaahdotetusta kovasta polyuretaanista, joka on esitetty kuvassa 4.8. Se on kevyttä pelkkään teräkseen verrattuna, mutta ominaisuudet ovat kuitenkin lähes terästä vastaavat ja erityisesti jäykkyys on huomattavan hyvä.



Kuva 4.9. Sandwich Plate Systemin rakenne, kuva Intelligent Engineering

Paneelit on juotettu toisiinsa kiinni ja näin saatu rakenne on liitetty pulttiliitoksilla kiinni laivan kantavaan rakenteeseen. SPS on materiaalina helposti liitettävää suurillekin alueille ja tästä syystä sitä voidaan käyttää hyvin suurien alueiden peittämiseen.

4.2. Yksittäiset ratkaisut

4.2.1. Utrechtin silta



Kuva 4.10 Utrechtin silta asennusvaiheessa, kuva Lightweight Structures

Alankomaalainen Lightweight Structures BV rakensi vuonna 2010 Hollannin Utrechtin komposiittikannellisen kävelysillan, jolla korvattiin 1970-luvulla rakennettu puusilta. Silta suunniteltiin hollantilaisen NEN6706 standardin mukaisesti. Tässä vaatimuksina olivat muun muassa yleinen 5 kN/m^2 kuorma, 7 kilonewtonin pistekuorma 100 neliömillimetrin alueelle sekä ajoneuvoja varten 65 kilonewtonin kuorma jaettuna neljän renkaan alueelle. Maksimitaipuma määriteltiin standardin NEN6702 mukaisesti ja oli alle kolme promillea pituudesta.



Kuva 4.11 Silta kokoonpanovaiheessa, kuva Lightweight Structures

Valmis siltapaneeli on 12 metriä pitkä, 5 metriä leveä ja korkeudeltaan 0,55 metriä. Sillan kokonaismassa on 7000 kilogrammaa. Silta valmistettiin kerroslevyrakenteena, jossa pintamateriaalina käytettiin lasikuitulujitettua polyesteriä ja ydinmateriaalina oli balsapuu. Silta päällystettiin kulutusta kestäväällä materiaalilla.

4.2.2. Komposiittisilta sotilaskäyttöön

Yhdysvalloissa kehitettiin armeijan ajoneuvojen käyttöön lyhyiden välimatkojen komposiittisilta. Sillat on suunniteltu käytettävän pareittain. Yksittäisen sillan kokonaispituus on 5,6 metriä ja sen leveys on 0,76 metriä. Siltojen komposiittiosa on kerroslevyrakenne, jossa materiaaleina ovat hiilikuidulla lujitettu epoksi, balsa sekä lasikuidulla lujitettu epoksi.



Kuva 4.12. Kuorma-auto ylittämässä komposiittisiltaa (19)

Yksittäisen sillan komposiittiosan massa on 204 kilogrammaa. Siltojen päihin liimattiin alumiinivahvikkeet ja koko rakenne päällystettiin ohuella polyuretaanielastomeerikerroksella. Yksittäisen sillan kokonaismassaksi tuli noin 340 kilogrammaa.

Sillat on valmistettu SCRIMP-tekniikalla, joka on Seemann -yhtiön erikoissovellus alipaineinjektiosta. Sillan mitoituksena oli Yhdysvaltojen armeijan käytössä oleva Military Load Class 30, jonka vaatimuksena on 27 000 kilogramman painoisen ajoneuvon kulkeminen sillan yli. Koska kyseessä on sotilaskäyttö, vaatimukset olivat huomattavat tiukat myös käyttölämpötilan suhteen.

4.3. Vertailu

Sivulle 19 taulukkoon 4.1 on koottu eri tuotteiden ominaisuudet sekä niiden raaka-aineiden arvioitu hinta. Hinta-arvion datana on käytetty lähdeä (11). Kaikki hinnat eivät ole suoraan vertailukelpoisia toistensa kanssa, sillä esimerkiksi Extrenin tapauksessa neliömetriltä oleva hinta tarkoittaa hyvin korkeaa tuotetta muihin verrattuna. Sekä Utrechtin sillasta että sotilassillasta ei ollut tietoa kuitujen määrästä, joka vaikeutti ratkaisevasti todellisen hinta-arvion antamista.

	Yksikkö	DuraSpan	SuperFiberSPAN	Asset	Extren DWB	Utrecht	Sotilassilta
Korkeus	mm	195	550	225	910	550	100
Pituus	mm	ei rajoitettu	6100 (15000)	ei rajoitettu	max 18300	12000	5600
Leveys	mm	200 - 250	2300	1000	460	5000	760
Massa	kg/m ²	93	100 - 170	100	226	120	48
Materiaalit		GF+PES	GF+VE+PIR	GF+PES	GF+CF+VE	GF+Balsa+PES	GF+CF+epoksi+balsa
Valmistustekniikka		Pultruusio	Paineinjektio	Pultruusio	Pultruusio	Paineinjektio	Paineinjektio
Raaka-aineiden hinta-arvio	€/m ²	170 - 330	220 - 830	170 - 400	2600 - 5800	-	-

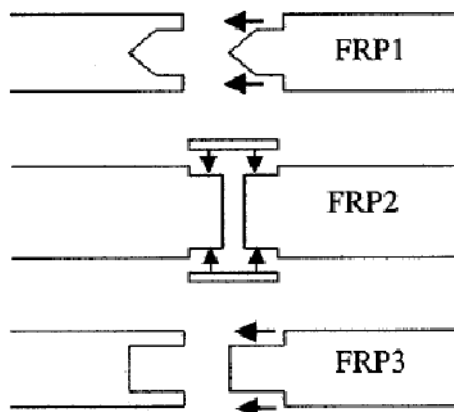
Taulukko 4.1. Komposiittituotteiden ominaisuusvertailu

5. LIIMAUS

Suuria rakenteita liitettäessä toisiinsa ja kantavaan rakenteeseen esiintyy useita erilaisia ongelmia. Komposiittien liittäminen teräsrakenteeseen on itse asiassa hybridituotteiden valmistamista. Liittämistapoja on lähes rajattomasti ja näistä hyvän tekniikan valitseminen voi olla yllättävän haastavaa. Tässä kappaleessa on kerrottu yleisimmistä komposiittien liittämistavasta eli liimaamisesta

5.1. Komposiitti-komposiitti -liitokset

Yleisin liitostapa erilaisten komposiittituotteiden välillä on liimaus. Liimoissa etuina on niiden helppo käytettävyys sekä hyvä tarttuvuus erilaisiin pintoihin. Tällöin voidaan myös välttää reikien tekeminen komposiittirakenteeseen, jolloin kuituja ei tarvitse katkoa. Optimitilanteessa voidaan käyttää samaa monomeeria liimassa ja komposiitin pinnassa, jolloin kappaleet saadaan polymeroitua toistensa kanssa ja siten aikaansaatu kemiallinen, hyvin yhteensopiva liitos. Polymeerit tarttuvat toisiinsa kuitenkin yleisesti ottaen hyvin, jolloin liimaliitokset myös erilaisten muovien välityksellä onnistuvat. Liimaliitokset ovat tyypillisesti joidenkin millimetrin paksuisia, joka tulee ottaa huomioon liitoskohtia suunniteltaessa. Liimaliitosten pitävyyttä voidaan parantaa erilaisilla muotoiluseikoilla. Tällaisista on esimerkkejä kuvassa kuvassa 5.1.



Kuva 5.1. Erilaisia liitostapoja (4)

Osalla liimoista on ominaisuutena niiden muodostama pieni elastinen alue kappaleiden välille. Suurissa komposiittikappaleissa on mahdollista muodostua eri materiaalien lämpölaajenemiskertoimien eroista tai muista asioista johtuvia jännityksiä. Käytettäessä

oikeanlaisia liimaliitoksia tällaisten jännitysten aiheuttamat pienet taipumat ja vääntymät voidaan saada minimoitua.

Liimauksessa tulee ottaa huomioon kuitenkin aina se, että kerran liimattua tuotetta ei saada purettua rakennetta rikkomatta. Tämän takia liimausta ei kannata käyttää, jos rakenne halutaan saada toistuvasti purettua. Usein liimaus on käsityötä, jolloin inhimillisen virheen aiheuttama vaara on huomattava. Tällöin on mahdollisuuksien mukaan suositeltavaa käyttää jotakin ainetta rikkomatonta testausmenetelmää liitoksen varmistamiseksi.

Liimat ovat yleensä erilaisten kertamuovien monomeerihartseja, jotka polymeroituvat liimausprosessin yhteydessä. Näissä on ongelmana se että, monomeerihartsit ovat yleensä myrkyllisiä ja tästä syystä niitä käsiteltäessä on käytettävä riittävää suojavarustusta ja ilmanvaihdon on oltava hyvä.

5.2. Komposiitti-teräs –liitokset

Eräs hybridimateriaaliluokka on teräksien ja komposiittien liitos. Tällaisia liitoksia voidaan tehdä vastaavilla tavoilla kuin pelkkien komposiittien välillä, mutta huomioon otettavia asioita on huomattavasti enemmän. Komposiitteja liitettäessä teräkseen vaihtoehtoja on useita. Koska teräs ja komposiitti eivät yleensä reagoi toisiinsa kemiallisesti, on myös liimaliitos peruseräiteeltään mekaaninen liitos. Perinteiset ruuvi- ja pulttiliitokset ovat silloin parempia kuin liimaus, kun liitoksesta halutaan tehdä syystä tai toisesta tilapäinen.

Liimattaessa teräksiä ja komposiittirakenteita toisiinsa on tärkeää tehdä pintakäsittely kunnolla. Erityisesti terästen pintaan jää helposti erilaisia rasva- tai muita epäpuhtausjäämiä, jotka voivat vaikuttaa liimauksen kiinnipysyvyyteen. Koska polymeerisidoksia teräksen ja komposiittipinnan välille ei voida muodostaa, on adheesion oltava muuten mahdollisimman hyvä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että liimattavan sauman tulee olla tiivis. Saumat voivat olla tapauksesta riippuen jopa useita kymmeniä millimetrejä, mutta minimissään vain yksittäisten molekyylien paksuisia.

5.3. Muut liitostekniikat

Liimauksen lisäksi käytetään myös niitti- ja pulttiliitoksia. Komposiittimateriaaleissa tavoitteena on saada mahdollisimman suuri katkeamaton kuitupituus ja sekä niitti- että pulttiliitoksissa reikien tekemiseltä ei voida välttyä, jolloin kuituja on välttämätöntä katkoa. Tällöin komposiittimateriaalin kuorman kantavuus heikentyy. Hybridimateriaaleille niitti-, ruuvi- ja pulttiliitokset soveltuvat silloin, kun käytössä ei ole kuitulujitettuja materiaaleja. (20)

5.4. Raskaisiin käyttökohteisiin soveltuvat liimatyyppit

Erilaisia liimatyypppejä on hyvin runsaasti erilaisia, mutta vain osa liimoista soveltuu komposiittirakenteisiin sekä raskaisiin käyttökohteisiin. Niille on luonteenomaista erittäin lujat sidokset sekä pitkä käyttöikä. Suurin osa niistä on kertamuovihartseja, mutta tämän lisäksi käytössä on joitakin kestumuoveja sekä erilaisia hybridiliimoja, joissa on useampia erilaisia hartseja. Tässä kappaleessa on kerrottu yleisimmistä käytössä olevista liimoista. Kertamuoveista raskaaseen käyttöön soveltuvat parhaiten epoksit ja niiden muunnokset, polyesterit, polyuretaanit sekä akryylipohjaiset liimat.

5.4.1. Epoksit

Epoksit ovat hyvin yleinen liimatyyppi ja niitä on ollut kaupallisesti käytössä jo vuodesta 1946. Epokseista on olemassa runsaasti erilaisia versioita ja ne soveltuvat hyvin suurelle skaalalle erilaisia materiaaleja ja käyttötarkoituksia. Niitä on saatavilla sekä yksi- että kaksikomponenttisina. Kaksikomponenttisissa epokseissa toinen komponentti on liimaharts ja toinen on kovetin. Tyypillisenä hartsinä on bisfenoli-A. Kun komponentit sekoitetaan, liimaharts polymeroituu ja kovettuu. Vastaavasti yksikomponenttisissa epokseissa kovetin on sekoitettu valmiiksi liimahartsin joukkoon, jolloin liima kovettuu esimerkiksi kosteuden avulla huoneenlämmössä. Epoksit ovat yleisesti ottaen keskihintaisia. (21)

5.4.2. Polyesterit

Polyesterit ovat edullisia liimoja, joskaan ne eivät sovellu aivan yhtä moneen sovelluskohteeseen. Niitä on saatavilla hyvin jäykistä versioista hyvin elastisiin ja niitä käytetään hyvin paljon komposiittien sidosmatriisina. Tästä syystä niillä pystytään saamaan aikaan hyvin lujia sidoksia myös erilaisten komposiittien välille ja ne soveltuvat luonnollisesti parhaiten polyesterikomposiittien liimaukseen. Polyestereitä on saatavilla epokseja vastaavasti sekä kiinteinä liimoina, nesteinä että yksi- ja kaksikomponenttisina liimoina. Polyestereitä on saatavilla sekä kerta- että kestumuovisina versioina. Molemmat liimaluokat ovat suhteessa edullisia. (21)

5.4.3. Polyuretaanit

Polyuretaanit ovat isosyanaattihartsipohjaisia liimoja, joita on saatavilla sekä yksi- että kaksikomponenttisina. Polyuretaanit ovat epoksien kaltaisia, mutta ne ovat huomattavasti elastisempia ja soveltuvat liikkeessä oleviin kohteisiin. Niillä on muihin liimoihin verrattuna parempi alhaisten lämpötilojen kesto, mutta ne eivät kestä erityisen korkeita lämpötiloja. Niitä on saatavilla sekä yksi- että kaksikomponenttisina versioina. Niiden hyvän tarttuvuuden vuoksi polyuretaaneilla on mahdollista liittää esimerkiksi hankalia muovisidoksia. (21)

5.4.4. Akryylit

Akryylejä on olemassa sekä kerta- että kestopuovihartseina. Näistä kestopuoviset eivät sovellu raskaaseen käyttöön, mutta kertapuoviset hartsit soveltuvat hyvin. Akryyleillä on erinomainen tarttuvuus erityisesti puoveihin ja ne sopivat myös lähes kaikille materiaaleille. Akryylien kenties suurin etu on niiden nopea kovettuminen. Niistä on olemassa laatuja, joissa liimasauma kuivuu käsittelykovaksi minuuteissa huoneenlämmössä. Tästä syystä niitä käytetään automatisoidussa teollisuudessa. Niissä on monesti tunnusomaisen paha, monomeerimäinen ominaishaju.(21)

5.4.5. Hybridiliimat

Hybridiliimat ovat yleensä joko epoksin tai fenolien seoksia ja niillä on hyvin laaja käyttöalue. Niitä on esimerkiksi epoksi-fenoleja, epoksi-uretaaneja, nitrilifenoleja ja neopreenifenoleja. Epokseilla on normaalisti suhteellisen hauras luonne, joka on mahdollista saada erilaisilla hybridirakenteilla elastisemmaksi. Hybridit voidaan luokitella keskihintaisiksi. (21)

6. TESTAUSMENETELMÄT

Työssä käytettiin testausmenetelminä liimoille vetokoetta, isolle paneelille kolmipistetaivutusta sekä pintapaneelille iskukoetta. Tässä kappaleessa on käyty lyhyesti läpi käytettyjen menetelmien toimintaperiaate.

6.1. Vetokoe

Liimoille tehtävä vetokoe mittaa liimaliitoksen leikkauslujuutta. Testaustapa valittiin sen yksinkertaisuuden ja selkeyden vuoksi. Liimojen vetokokeelle on olemassa standardi ASTM D 1002, jossa koeksuojien mitat ovat 25 mm x 100 mm ja liimattavan sauman pituus on 12,5 millimetriä. Testattavaa näytettä vedetään tasaisesti 2 mm/min murtolujuuteen saakka, josta saadaan määritettyä vetoleikkauslujuus jakamalla murtokuorma liimasauman pinta-alalla kaavan 1 mukaisesti (22). Kuvassa 6.1 on esitetty Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitoksen vetokoelaitteisto.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$



Kuva 6.1. Liimanäyte Materiaaliopin laitoksen Instron-vetokonelaitteistossa

Tässä työssä mitat eivät olleet aivan standardin mukaisia, vaan sauvojen leveys oli noin 20 millimetriä ja liimasaumojen vaihteluväli oli noin 17 – 21 millimetriä. Tarkemmat tiedot sauvojen mitoista löytyvät liitteistä 1 ja 2. Kuvassa 6.2 on esitetty käytettävä vetokoesauva. Näytteen reunoihin piti teipata pienet apupalat, jotta koesauva saatiin kiinnitettyä kunnolla vetokoelaitteistoon.



Kuva 6.2. Liimauksen vetokoesauva

6.2. Kolmipistetaivutus

Kolmipistetaivutuksessa tutkittavaa kappaletta kuormitetaan keskeltä yhdestä pisteestä ja se on tuettu reunoiltaan kahdesta pisteestä. Tällöin tasaisesti siirtymää kasvattamalla voidaan määrittää tutkittavan materiaalin kohdistuva voima ja taipuminen. Tässä työssä kolmipistetaivutus tehtiin TTY:n Rakennustekniikan laitoksen tiloissa isolla taivutuslaitteistolla, jossa puristimen maksimikuorma oli 250 kilonewtonia. Taivutuslaitteisto on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.3. Tutkittava paneeli taivutuslaitteistossa

6.3. Pudotuskoe

Pudotuskokeessa on tarkoituksena tutkia pinnan iskunkestävyyttä. Pinnalle tiputetaan tietyn painoinen punnus eri korkeuksilta ja tällöin saadaan määritettyä pintaan osuva iskuenergia jouleina kaavan 2 mukaisesti. Samalla voidaan visuaalisesti tarkastaa pintaan aiheutunut vaurio.

$$E = mgh \quad (2)$$

Tässä tapauksessa testausta ei tehty minkään tietyn standardin mukaisesti, vaan käytössä oli huomattavasti tyypillistä iskukoelaitetta raskaampi punnus. Testaus tehtiin Materiaaliopin laitoksen Kuitumateriaalitekniikan tiloissa, jossa oli olemassa valmis pudotuslaitteisto. Laitteistossa ei ollut valmiina riittävän raskasta punnusta, joten sellainen teetettiin Materiaaliopin raskaassa laboratoriossa. Punnus painaa noin 9,2 kilogrammaa ja se on esitetty kuvassa 6.4. Pudotuslaitteisto on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.4. Iskukokeessa käytetty kymmenen kilon punnus



Kuva 6.5. Pudotuskokeen laitteisto

7.1. Materiaalien valinta

Lasikuitulujitettujen komposiittien ominaisuudet olivat jo kirjallisuuden kautta osoittautuneet käyttökelpoisiksi. Pitkiin pultruusioprofiileihin päädyttiin niiden helpon käsittelyn vuoksi sekä suhteellisen edullisen hankintahinnan perusteella. Etuna oli myös profiilien nopea saatavuus suoraan varastosta. Profiilit toimitti suomalainen Exel Composites Oyj. Liitokset paneeliin päätettiin toteuttaa liimaamalla ja käytettävänä adhesiiveina käytettiin Scott Baderin valmistamaa Crestabond PD10195- akryyliiimaa sekä Huntsmanin valmistamaa Araldite 2014- epoksiliimaa. Molemmat liimat soveltuivat valmistajien mukaan komposiittien liimaukseen. Kaksi erilaista liimaa valittiin kahdesta eri syystä. Paneelia kasattaessa oli selvää, että pitkissä saumoissa tarvitaan rakoja täyttävää liimaa. Molemmat näistä liimoista soveltuivat rakojen täyttöön, mutta Crestabond oli litrahinnaltaan huomattavasti edullisempaa. Kuitenkin kriittisimmät kohdat paneelissa oli saatava kiinnitettyä ilman välystä, jollaiseen Araldite soveltui paremmin. Valmistajien tietojen perusteella Araldite on hieman lujempaa liimaa ja Crestabond taas hieman elastisempaa. Taulukossa 7.1 on esitetty osa liimojen ominaisuuksista.

Ominaisuus	Araldite 2014-1	Crestabond PD10195
Kovetus aika 1 MPa @ 23°C	3 h	
Kovetus aika 10 MPa @ 23°C	5 h	
Liimakerroksen paksuus	0,05 – 5 mm	1 – 25 mm
Komponenttien määrä	Kaksi	Kaksi
Väri sekoituksen jälkeen	Harmaa	Beesi
Vaadittavat esikäsittelyt	Hionta ja asetoni	Hionta ja asetoni
Käyttöaika sekoituksen jälkeen	60 min	20 min
Liimatyyppi	Epoksi	Akrylaatti

Taulukko 7.1. Käytettävien liimojen ominaisuudet

7.2. Profiilien sahaaminen

Profiilit saatiin kuuden metrin mittaisina eli ensimmäisenä työvaiheena oli niiden sahaus. Pitkien profiilien sahaaminen toteutettiin vannesahalla ja jyrsimällä lyhyempiin osiin. Sahaus onnistui hyvin ja pitkät kappaleet saatiin noin kahden millimetrin toleranssilla oikeaan mittaan, joka tarkoittaa noin promillen toleranssia. Sahatut profiilit on esitetty kuvassa 7.2. Liitteessä 3 on tarkempi erittely sahauksesta.



Kuva 7.2. Pultruusioprofiilit sahauksen jälkeen

7.3. Liimojen testaus

Ensimmäisenä testauksena toteutettiin liimojen vetolujuus. Koesauvat tehtiin jyrinnässä ylijääneistä L-profiilin osista, jotka liimattiin toisista päistään yhteen. Sauvoista on kuva 7.3.

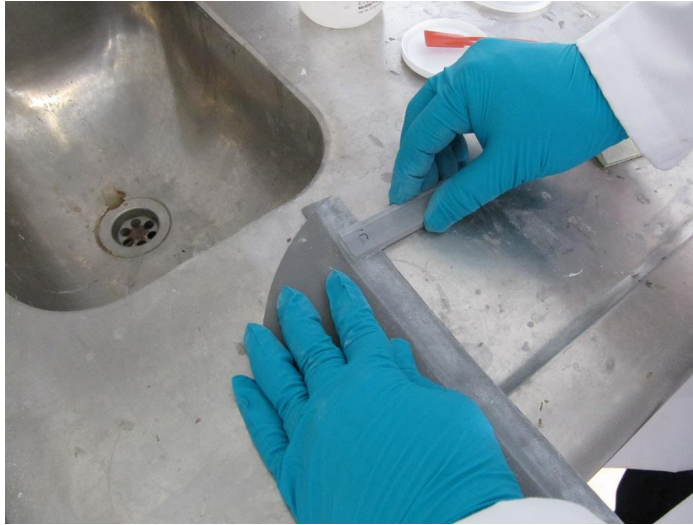


Kuva 7.3. Crestabond- näytesauvat odottamassa vetokoetta

7.3.1. Näytekappaleiden valmistus

Näytekappaleet valmistettiin L-palkin leikkauksen yhteydessä yli jääneistä paloista, joiden paksuus oli 8 millimetriä. Kappaleet sahattiin Materiaaliopin laitoksen laikkaleikkurilla pituudeltaan 100 millimetrin ja leveydeltään 20 millimetrin kokoisiin kappaleisiin. Kaikki näytteet sahattiin kuitujen suuntauksen suhteen vastaavasti. Sahaus onnistui melko hyvin ja saavutettiin noin puolen prosentin toleranssi. Näytekappaleet jaettiin liimauspareiksi siten, että päiden pinta-alat olivat mahdollisimman lähellä toisiaan. Ennen jokaisen kappaleen liimausta näytteiden päät

hiottiin käsin P1200-tyyppisellä hienolla hiomapaperilla vetokaapissa. Näytteet pestiin asetonilla ennen ja jälkeen hionnan samoin vetokaapissa. Liitteissä 1 ja 2 on esitetty näytekalvojen valmistuksesta saatu data.



Kuva 7.4. Liimanäytesauvan pään hionta

7.3.2. Crestabond -näytteiden valmistus

Ensimmäinen testattu liima oli Crestabond PD10195. Se on kaksikomponenttinen, huoneenlämmössä eksotermisen vaikutuksesta kovettuva akryyliliima, jonka käsittelyaika komponenttien sekoituksen jälkeen on 20 minuuttia. Liimaus suoritettiin vetokaapissa. Liimaa pursotettiin erilliseen alumiiniastiaan ja sekoitettiin puulusikalla ennen liimausta. Kun liima oli levitetty toisen näytteen pinnalle, näytteiden väliin laitettiin vielä pätkä millimetrin paksuista siimaa riittävän materiaalipaksuuden varmistamiseksi. Kaikki näytteet liimattiin erikseen ja jätettiin kyljelleen kovettumaan pienen puristuksen alle. Kuvassa 7.5 on tilanne näytteiden kuivaustilanteesta, jossa taustalla ovat liimapatruuna sekä alumiininen sekoitusastia.



Kuva 7.5. Crestabond- liimanäytteet kuivumassa liimausjigeissä

Näytteitä valmistettiin viisi kappaletta. Kaikki näytteet eivät onnistuneet aivan täydellisesti. Osaan näytteistä ei tullut täydellistä liimasaumaa, joka näkyi huokoisuutena näytteen reunassa. Tämän lisäksi liimasauman pituus ja leveys vaihteli näytteiden välillä hieman. Liimauksen aikana tuli myös todettua Crestabondin huomattavan vahva ja epämiellyttävä ominaisuus, joka vetokaapin ansiosta saatiin kuitenkin minimoitua. Huomioitavaa oli myös eksotermisestä reaktiosta aiheutuva lämpö; alumiiniastia oli huomattavan kuuma komponenttien sekoituksen jälkeen.

7.3.3. Araldite 2014- näytteiden valmistus

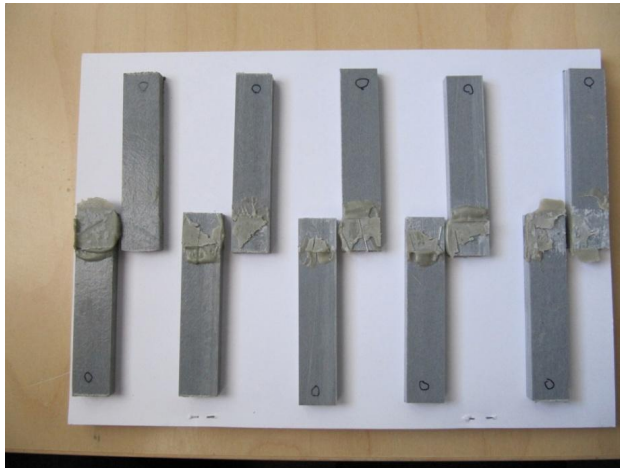
Esivalmistelut Aralditen liimaukseen olivat vastaavat kuin Crestabondillekin. Araldite on kaksikomponenttinen, huoneenlämpötilassa kovettuva epoksiliima. Näytteiden valmistuksessa ei ollut ongelmia, sillä siinä ei sauman paksuudella ollut yhtä tarkkaa minimiä kuin Crestabondilla. Valmistajan mukaan tyypillisesti parhaat lujuusominaisuudet saadaan noin 0,05 – 0,10 millimetrin paksuisilla kerroksilla ja tästä syystä ne puristettiin huomattavasti tiukemmin kuin Crestabond- näytteet. Näytteitä valmistettiin vastaavasti viisi kappaletta. Kuvassa 7.6 on esitetty Aralditen liimaus. Siitä näkyy hyvin Aralditen tumma väri. Se oli myös huomattavasti jäykempää liimaa Crestabondiin verrattuna ja sitä sekoitettiin tästä syystä muovisessa pikarin kannessa. Aralditen toinen pääkomponentti on bisfenoli-A, joka on myrkyllistä. Aralditen ominaisuus ei ollut lainkaan yhtä väkevä kuin Crestabondin.



Kuva 7.6. Araldite-näytteen liimaus

7.3.4. Vetokoe Crestabondille

Näytteille tehtiin vetokokeet Materiaaliopin laitoksen Instron- vetokoneella. Crestabondin tapauksessa liimaus oli osittain epäonnistunut ja liimasaumat pettivät osittain rajapinnoiltaan. Näytteissä 2 ja 3 oli havaittavissa selkeää huokoisuutta ja se johtui liian pienestä liiman määrän annostelusta. Kuvassa 7.7 on esitetty Crestabond-liimanäytteet vetokokeen jälkeen.

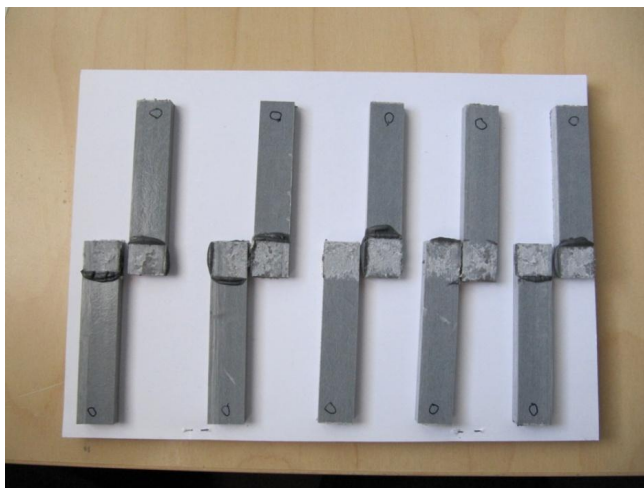


Kuva 7.7. Crestabond- näytteet vetokokeen jälkeen järjestyksessä I – V

Vaikka näytteet eivät onnistuneetkaan täydellisesti, niistä saatiin hyvää tietoa Crestabondin liitoslujuuksista. Pahiten epäonnistuneelle kakkosnäytteellekin saatiin lujuudeksi lähes kymmenen megapascalia, joka on hyvä tulos.

7.3.5. Vetokoe Aralditelle

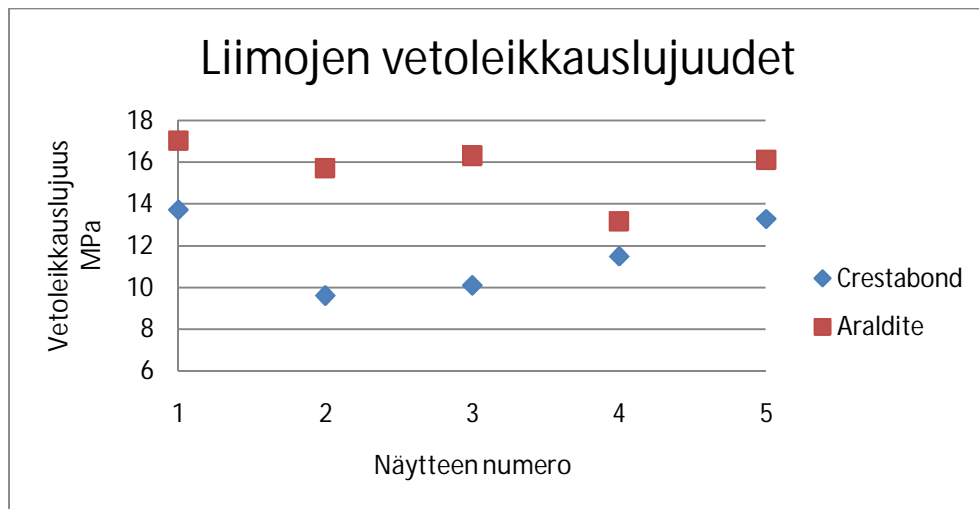
Vetokokeet Araldite-näytteille suoritettiin vastaavalla tavalla kuin Crestabond-näytteille. Kaikki Araldite-näytteet onnistuivat hyvin ja niistä saatiin siistejä koheesivisia murtumia. Niissä oli selvästi nähtävissä kuitujen repeäminen kummastakin pinnasta. Näytteet on esitetty kuvassa 7.8. Niillä oli selvästi lujemmat sidokset Crestabond-näytteisiin verrattuna.



Kuva 7.8. Araldite- näytteet vetokokeen jälkeen järjestyksessä VI – X

7.3.6. Liimojen vertailu vetokokeiden perusteella

Kuvassa 7.9 on esitetty liimanäytteiden vetoleikkauslujuudet. Niistä nähdään, että Aralditella on muutaman megapascalin verran lujemmat sidokset ja keskiarvo liimasidoksille on noin 16 megapascalialia. Toisaalta nähdään myös se, että onnistuneilla Crestabond- näytteillä on myös huomattavan hyvät arvot ja niiden keskiarvo on noin 12 megapascalialia.



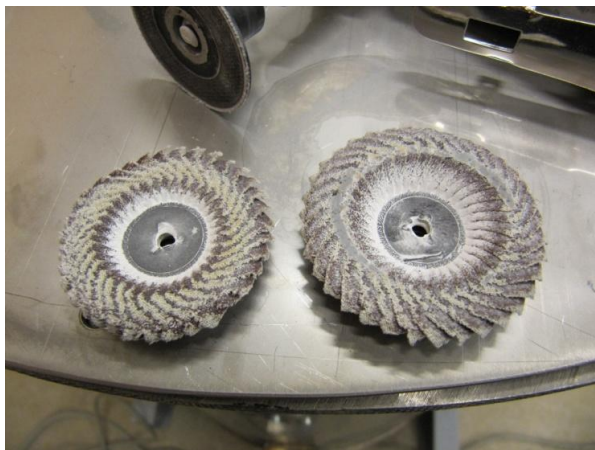
Kuva 7.9. Liimanäytteiden vetoleikkauslujuudet

Vetokokeiden perusteella voitiin päätellä, että Crestabond soveltui suunniteltuun käyttötarkoitukseensa eli pitkien osien liittämiseen toisiinsa. Aralditen käyttö voitiin keskittää yksittäisten, pienten kohtien liimaamiseen. Tästä saatiin arvio, että Crestabondia kuluisi millimetrin materiaali-paksuudella noin 1,3 litraa ja Aralditea 0,1 millimetrin materiaali-paksuudella 0,1 litraa. Kumpaakin liimaa hankittiin varmuuden vuoksi yksi ylimääräinen patruuna, jolloin Crestabondia oli yhteensä 1,9 litraa ja Aralditea yhteensä 0,4 litraa.

7.4. Iso paneeli

7.4.1. Hionta

Ensimmäinen vaihe ison paneelin kokoamisesta oli liimattavien pintojen hiominen. Hiominen suoritettiin paineilmakäyttöisellä hiomakoneella, josta on kuva 7.10. Suurin osa liimattavista pinnoista hiottiin ennen liimauksen aloitusta ja hiontaa tarkennettiin muutama kerta myöhemmin. Hionta tehtiin kevyesti ja siinä pyrittiin ainoastaan saamaan pinnan kiilto pois. Liimattavat pinnat pestiin asetonilla aina ennen varsinaisen liimauksen aloittamista. Hionnasta on kuva 7.11.



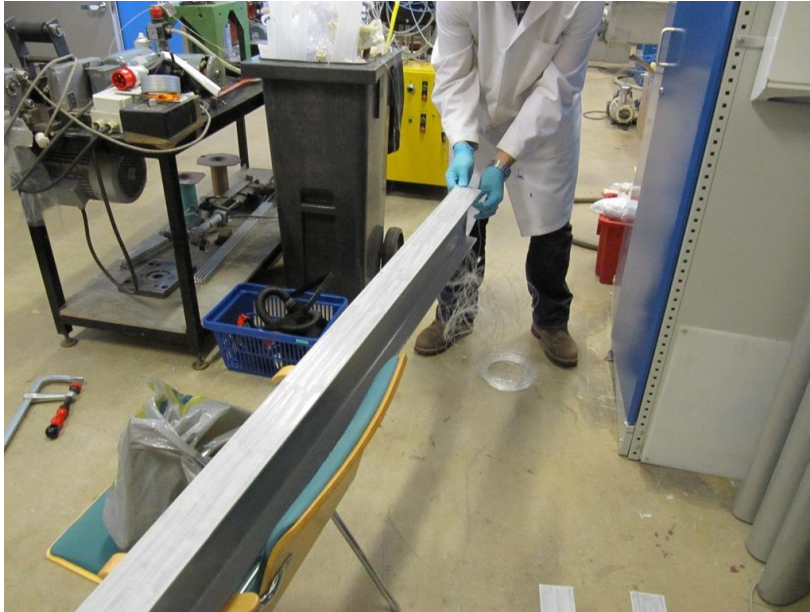
Kuva 7.10. Ison paneelin hionnassa käytetyt hiomapaperit



Kuva 7.11. Paneelin reunan hionta

7.4.2. Paneelin osien liimaus

Ison paneelin kokoaminen aloitettiin liimaamalla alapohjan palkit kiinni toisiinsa. Tässä käytettiin apuna siimaa, joka pujotettiin palkkirakenteen ympäri. Tästä on kuva 7.12. Siiman pujotuksen jälkeen I-palkit liimattiin U-palkkien päälle Crestabondilla ja niiden annettiin kuivua. Kuvassa 7.13 on kuva palkin liimaustilanteesta, jossa toinen henkilö annostelee liimaa ja toinen tasoittaa liiman palkin pinnalle.



Kuva 7.12. Siiman pujottaminen I-palkin ympärille



Kuva 7.13. Crestabondin levitys I-palkin päälle

Liiman kuivuttua palkkien päihin liimattiin liimaustukiläpät. Tämä on esitetty kuvassa 7.14. Tukiläppien kovettumisen jälkeen paneelien päälle liimattiin kannet. Kansien liimaus on esitetty kuvassa 7.15. Kansien jälkeen paneelit liimattiin toisiinsa kiinni, josta on kuva 7.16. Paneelien liimaus toisiinsa ei onnistunut täydellisesti, vaan niiden väliin jäi selvä rako.



Kuva 7.14. Liimauksen tueksi tulevien läppien kiinnitys



Kuva 7.15. Päälle tulevan U-paneelin liimaus



Kuva 7.16. Paneelien rinnakkaisliimaus

Kun ison paneelin liimaus oli valmis, sen päihin liimattiin reunat. Reunatuet liimattiin ensin yhteen ja niiden valmistuksesta on kuva 7.17. Reunat liimattiin isoon rakenteeseen kahdessa osassa.



Kuva 7.17. Reunatuen liimaus

Valmis paneeli oli hieman yli kaksi metriä pitkä, 45 senttimetriä leveä ja noin 16 senttimetriä korkea. Sen massaksi tuli hieman yli 60 kilogrammaa ja valmis paneeli on esitetty kuvassa 7.18.

7.5. Ison paneelin testaus

Iso paneeli testattiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen raskaassa laboratorioissa. Paneelille tehtiin kaksi erillistä testiä. Ensimmäisessä testissä paneeli tuettiin reunatuistaan ja jälkimmäisessä testissä tuet laitettiin pitkien palkkien alle.

7.5.1. Ensimmäinen testaus

Ensimmäisestä testauksesta ovat kuvat 7.18 ja 7.19. Tässä paneeli tuettiin reunoihin rakennettujen tukien päälle ja puristettiin keskeltä koko paneelin levyisellä puristuksella. Paneelia puristettiin siten, että pidempi reunatuen pää oli suunnattu alaspäin ja lyhyempi ylöspäin. Puristimen alapuolelle laitettiin lisäksi pala kuitulevyä, joka jakoi kuormaa puristuskohdasta.



Kuva 7.18. Ensimmäisen testauksen koejärjestely

Testi tehtiin vakiosiiirtymällä, joka aluksi oli 0,5 millimetriä minuutissa, mutta sitä nopeutettiin kahteen millimetriin minuutissa. Aluksi puristus painoi paneelin lisäksi kuitulevyä ja siirtymä ei siis suoraan kertonut paneelin todellista siirtymää. Noin viiden millimetrin siirtymän kohdalla tuloksissa havaittiin epäjatkuvuuskohta, jossa oletettavasti kuitulevy oli saavuttanut maksimipuristuksensa. Testiä jatkettiin siihen asti, että reunassa olevien tukien liimaukset alkoivat pettää. Reunasta kuului ja näkyi liimasauman katkeaminen toisesta päästään. Tällöin voima oli noin 22 kilonewtonia ja siirtymä oli 10 millimetriä. Testi lopetettiin välittömästi.



Kuva 7.19. Ensimmäisen testauksen reunatuenta

7.5.2. Toinen testaus

Toinen testaus aloitettiin heti ensimmäisen testin päätyttyä. Testi suoritettiin muuten vastaavalla tavalla kuin ensimmäinenkin testaus, mutta siinä reunatuet siirrettiin ison paneelin alareunalle. Tämän lisäksi taipuma haluttiin saada mitattua tarkasti ja tästä syystä koepaneelin alle laitettiin siirtymäanturi. Reunatuennasta on kuva 7.20 ja siirtymäanturista kuva 7.21. Toinen testaus tehtiin siirtymänopeudella 2 millimetriä minuutissa ja sitä jatkettiin niin kauan, kunnes paneeliin kohdistettu voima saavutti 100 kilonewtonin kuorman. Tällöin taipuma oli noin 13,4 millimetriä.



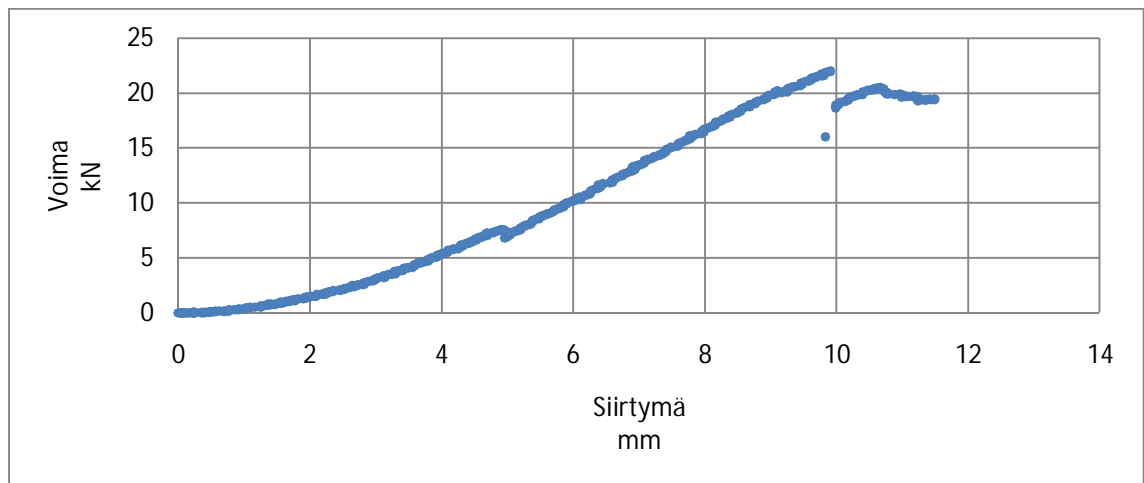
Kuva 7.20. Toisen testauksen tuenta



Kuva 7.21. Toisessa testauksessa käytetty siirtymäanturi

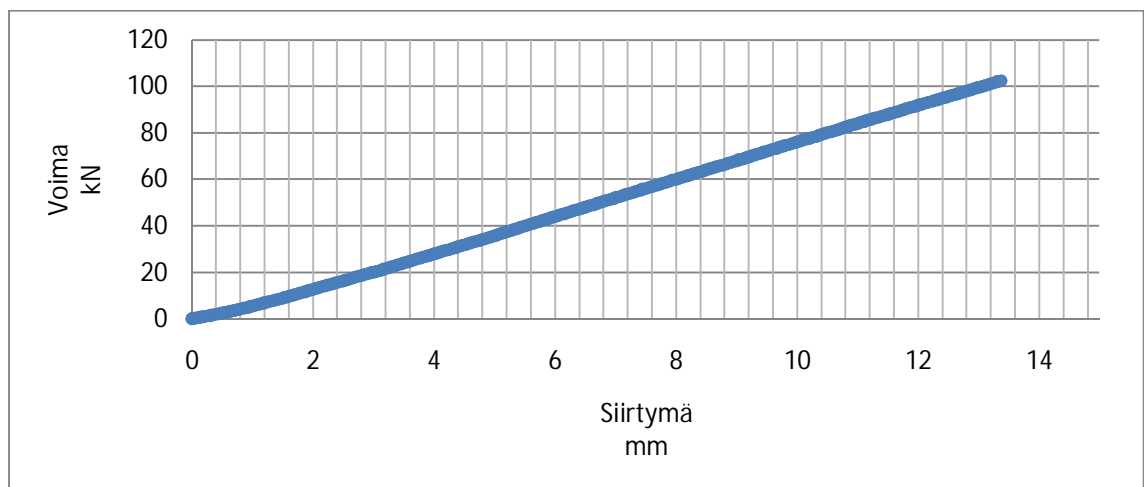
7.5.3. Testitulokset

Ensimmäinen testaus osoitti, että reunaan suunnitellut tuet eivät olleet riittävän kestävä. Reunatuot eivät kestäneet niihin kohdistuvia jännityksiä ja niissä olevat liimasaumat pettivät jo hieman yli 20 kilonewtonin kuormalla. Siirtymä ei ole tässä tapauksessa täysin vertailukelpoinen toisen testin kanssa, koska tässä ei ollut käytössä erillistä siirtymäanturia. Noin viiden millimetrin kohdalla näkyy epäjatkuvuuskohta, jossa käytetty pintalevy ei oletettavasti enää puristunut kasaan enempää ja siirtymä on tästä eteenpäin lineaarinen.



Kuva 7.22. Ensimmäisen kolmipistetaivutuksen data

Toisessa testauksessa varsinainen testi oli ison paneelirakenteen kestävyys, mutta samalla myös liimasaumojen kesto. Kuvasta 7.23 nähdään, että liimasaumat ja rakenne itsessään kestivät sadan kilonewtonin kuorman ilman ongelmia. Koska paneeli haluttiin säilyttää ehjänä, testi lopetettiin kesken. Kun testi keskeytettiin, paneeli palasi täysin alkuperäiseen muotoonsa. Tämä oli pienimuotoinen yllätys, koska reunapaneelien välillä olleet liimasaumat eivät olleet täysin homogeeniset.



Kuva 7.23. Toisen kolmipistetaivutuksen data

7.6. Pintapaneeli

Ison paneelin lisäksi testattiin erillistä pintapaneelimateriaalia. Pintamateriaalina oli Exel Composites Oyj:n UTILO-plank, joka on materiaaliltaan vastaavaa lasikuitulujitettua polyesteripultruusioprofiilia kuten muutkin työssä käytetyt profiilit. Profiilin pintalevyn vahvuus on noin 3 millimetriä ja jäykistintankojen paksuus noin 5 millimetriä.

7.6.1. Käytettävä materiaali

Ison paneelin lisäksi testattiin ison paneelin päälle tulevaa suojapintapaneelia, josta idea on kuvassa 7.24.. Testit tehtiin pudotuskokeilla Materiaaliopin laitoksen Kuitumateriaalitekniikan tiloissa ja tätä varten profiili sahattiin pienemmiksi paloiksi. Paneelin työstämisestä testausmittoihin on kuva 7.25. Testattavat paneelin palat olivat mitoiltaan noin 40 cm x 50 cm ja jokaiseen palaan oli tarkoitus tehdä useampia pudotuksia.



Kuva 7.24. Pintapaneeli ison paneelin päällä



Kuva 7.25. UTILO-plankin sahaus testikappaleiksi

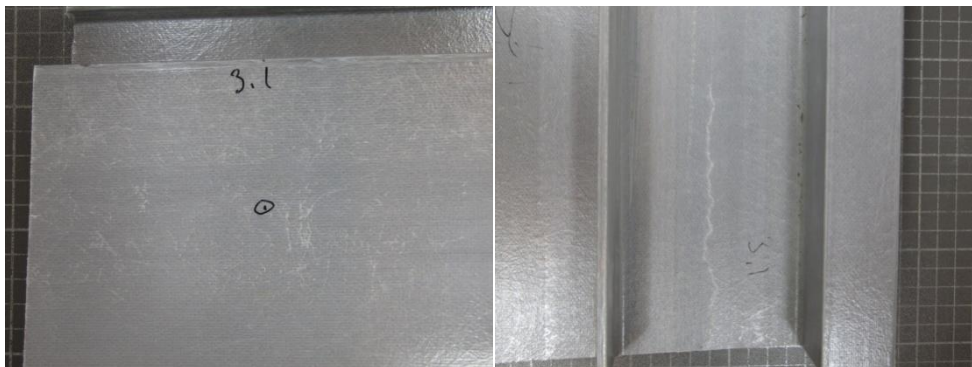
7.6.2. Pintapaneelin testaus

Testaus tehtiin kolmessa osassa. Ensimmäisessä osassa tiputettiin punnusta koeluonteisesti 25 senttimetrin välein paneelin reunaan, kuitenkin kohtaan, jossa ei ollut jäykistintä. Punnuksen pudotuksesta on esitetty kuva 7.26. Paneelitestauksen ensimmäinen osa epäonnistui, koska paneelin toinen reuna ei koskettanut maata. Isku ei siis osunut suoraan paneeliin, vaan aluksi ainoastaan paneelin reuna taipui. Tästä aiheutui niin suuri virhe, että ensimmäisen osan tuloksia ei käsitelty.



Kuva 7.26. Pudotuskoe metrin korkeudelta

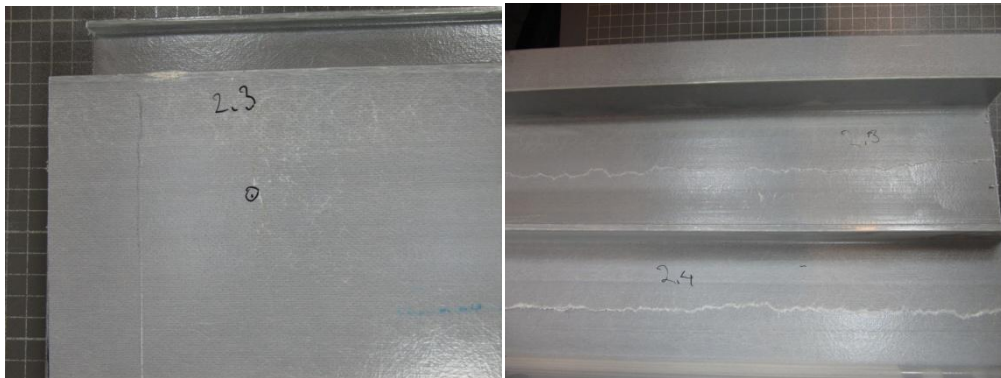
Toisessa osassa testausta punnus tiputettiin myös ensimmäisen osan tapaan jäykistimien väliin, mutta tällä kertaa tiputus toteutettiin paneelin toiseen reunaan. Toisessa reunassa paneeli on tuettu paremmin reunaan ja tämä testi onnistui hyvin. Pudotukset tehtiin vastaavalla tavalla 25 senttimetrin välein. Noin metrin korkeudelta tehty pudotus halkaisi paneelin lähes kokonaan ja 125 senttimetrin korkeudelta pudotettu punnus käytännössä katsoen halkaisi koko paneelin kuitujen suuntaisesti. Kuvissa 7.27 – 7.31 on esitetty toisen osan pudotuskokeista saadut kuvat.



Kuva 7.27. Profiili 25 senttimetrin korkeudelta pudotetun painon jälkeen



Kuva 7.28. Profiili 50 senttimetrin korkeudelta pudotetun painon jälkeen



Kuva 7.29. Profiili 75 senttimetrin korkeudelta pudotetun painon jälkeen, oikealla olevassa kuvassa ylhäällä



Kuva 7.30. Profiili 100 senttimetrin korkeudelta pudotetun painon jälkeen, oikealla olevassa kuvassa keskellä

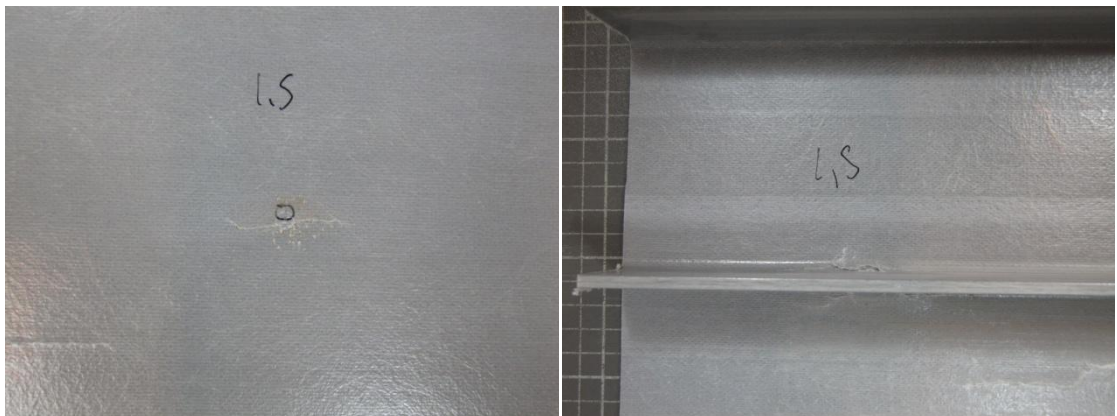


Kuva 7.31. Profiili 125 senttimetrin korkeudelta pudotetun painon jälkeen

Kolmannessa osassa pudotettiin punnus jäykistimen kohdalle kolmelta eri korkeudelta. Nämä onnistuivat hyvin ja paneeli kesti suhteellisen hyvin nämä kaikki pudotukset. Näistä saadut kuvat on esitetty kuvissa 7.32 – 7.34.



Kuva 7.32. 100 senttimetrin korkeudelta pudotettu paino jäykistimen kohdalle



Kuva 7.33. 125 senttimetrin korkeudelta pudotettu paino jäykistimen kohdalle



Kuva 7.34. 150 senttimetrin korkeudelta pudotettu paino jäykistimen kohdalle

7.6.3. Testitulokset

Paneelin pudotuskokeesta saadut tulokset ovat taulukossa 7.2 ja tämän lisäksi liitteessä 7 on kaikki aiheeseen liittyvä data. Yläpinnalla tarkoitetaan kohtaa johon paino osui ja alapinnalla paneelin alapuolta. Jäykistimien väliin tehdyt pudotukset paljastivat sen, että noin neljän millimetrin paksuinen levy oli jo alle 70 joulen iskulla mennyt niin pahasti rikki, että sen korjaaminen olisi hyvin hankalaa. Suurimmalla pudotuskorkeudella eli noin 110 joulen iskulla sekä ylä- että alapinta halkesi kokonaan. Sen sijaan jäykistimen kohdalle tehty koe osoitti, että suurinkaan pudotuskorkeus ei tehnyt rakenteeseen suurta vahinkoa.

Testi	Korkeus m	Iskuenergia J	Yläpinnalle tullut jälki	Alapinnalle tullut jälki
3.1	0.25	22.49	Pieni jälki	10 cm halkeama
3.2	0.5	44.99	Pidempi halkeama	15 cm halkeama
2.3	0.75	67.48	Pieni jälki	80% repeämä kuituja pitkin
2.4	1	89.98	Vakava repeämä	100% repeämä kuituja pitkin
1.3	1.25	112.47	Vakava repeämä	Vakava repeämä
1.4	1	89.98	Pieni jälki	Pientä repeämistä
1.5	1.25	112.47	Pieni jälki	Pientä repeämistä
3.3	1.5	134.97	Pieni jälki	Pientä repeämistä kuituja vastaan

Taulukko 7.2. Pudotustestin mittaustulokset

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kirjallisuuden perusteella liimatut pultruusiopaneelit soveltuvat rakennekomposiittikäyttöön. Tehtyjen testien perusteella tämä pystytään vahvistamaan. Työn puitteissa valmistettu paneelirakenne soveltuu hyvin esimerkiksi sillan kansipaneelirakenteeksi ja rakennetta voi olla mahdollista vielä yksinkertaistaa sekä keventää. Reunoihin suunnitellut tukirakenteet eivät sovellu käyttöön niiden heikon kestävyys ja haastavan liimauksen vuoksi.

Liimauksessa elastisempi PMMA-liima osoittautui testausvaiheessa paremmaksi vaihtoehdoksi kuin jäykkä epoksiliima. Toisaalta epoksi on helpommin käsiteltävä ja soveltuu liimauskohtiin, joissa dynaaminen kuorma on minimissään. On mahdollista, että jokin polyesteri- tai polyuretaaniliima voi olla testattuja liimatyyppisiä parempi vaihtoehto.

Iskunkestävä pintapaneeli vaatii suuremman määrän jäykistimiä tai suuremman materiaalipaksuuden pintapaneelin pinnalle, jos halutaan saada yli sadan joulen kesto paneelin pintaan tuleville iskuille. Lopulliset johtopäätökset työn eri osavaiheista ovat seuraavat:

1. Erilaisilla hybridi- ja komposiittimateriaaleilla on mahdollista keventää kuormaa kantavia rakenteita, mutta rakenne tulee suunnitella alusta asti riittävän kevyeksi. Muuten painonsäästö suhteessa hintaan voi olla kannattamaton.
2. Pultruusiolla valmistetut polyesteri-lasikuituprofiilit soveltuvat hyvin käyttöön tällaisissa rakenteissa suurissa rakenteissa. Niitä on myös mahdollista työstää samoilla työstölaitteilla kuin puuta tai metalleja.
3. Työssä käytetyt epoksi- ja PMMA-pohjaiset liimat soveltuvat lasikuitulujitettujen profiilien yhteen liittämiseen. Näistä epoksi on helpommin käsiteltävää ja sidoksiltaan lujempaa, mutta PMMA edullisempaa.
4. PMMA-liimassa millimetrin paksuinen kerros on riittävä hyvän lujuuden saavuttamiseksi, mutta kovettumisen varmistamiseksi kerros voi olla huomattavasti paksumpi. Epoksilla kymmenesosamillimetri on riittävä.
5. PMMA-liima soveltuu paremmin rakojen täyttöön ja epoksi tilanteisiin, joissa mahdollisimman ohut liimakerros on etu. Käytetyn PMMA:n elastisuus on huomattavasti parempi kuin työssä käytetyn epoksin.

6. Liimaus tulee tehdä jossakin suljetussa tilassa, jossa on hyvä ilmanvaihto tai vaihtoehtoisesti ulkotiloissa. Molemmat työn puitteissa käytetyt liimat olivat niin haitallisia, että niitä käytettäessä moottoroidut hengityksensuojaimet olivat välttämättömät.
7. Liimasidoksia suunniteltaessa liimattavien kappaleiden pinnat kannattaa alusta asti suunnitella liimausta ajatellen mahdollisimman hyvä lopputuloksen aikaansaamiseksi.
8. Pintapaneelin testauksessa kävi ilmi, että UTILO-plank on jäykistimien kohdalta soveltuva pintapaneeliksi, mutta jäykistimien välillä soveltuvuus on heikko. Jäykistimien tiheämpi sijoitus on suositeltavaa, jos tällaista suojapinnoitetta halutaan käyttää.
9. Iso paneeli onnistui hyvin ja tällainen rakenne on toteutuskelpoinen. PMMA-liima soveltui hyvin pitkiin liimauksiin.
10. Työssä suunnitellut, pultuusioprofiilista reunaan rakennetut komposiittiset kulmatuet eivät ole riittävän kestäviä. Tämä johtuu osittain hankalasta liimauksesta ja osittain komposiittien ominaisuuksista.

LÄHTEET

- [1] Airasmaa, Kokko, Komppa, Saarela. Muovikomposiitit. Jyväskylä, Gummerus Kirjapaino Oy, 1991
- [2] Hollaway, L.C. A Review of the Present and Future Utilisation of FRP Composites in the Civil Infrastructure with Reference to Their Important In-Service Properties. Construction and Building Materials 24 (2010), pp. 2419-2445
- [3] Hoffard, T.A., Javier M.L. Fiber-Reinforced Polymer Composites in Bridges: A State-of-the-art Report: Port Hueneme, Naval Facilities Engineering Service Center, 2005.
- [4] Reising, R.M.W., Shahrooz, B.M., Hunt, V.J, Neumann, A.R., Helmicki, A.J., Hastak, M. Close Look at Construction Issues and Performance of Four Fiber-Reinforced Polymer Composite Bridge Decks. Journal of Composites for Construction. Vol. 8. February (2004), pp. 33-42.
- [5] Market Development Alliance of the FRP Composites Industry. Global FRP use for Bridge Applications: Vehicular. 2003
- [6] Luke, Sam. Building West Mill Bridge in Reinforced Plastics. Reinforced Plastics January 2003.
- [7] Composite bridge decks cut life cycle costs. Reinforced Plastics, October 2008. pp. 30-32
- [8] Harris, D. K. Lateral Load Distribution and Deck Design Recommendations for the Sandwich Plate System (SPS) in Bridge Applications. Blacksburg, 2007
- [9] Mouritz, A.P., Review of Advanced Composite Structures for Naval Ships and Submarines. Composite Structures 53 (2001), pp. 21-41
- [10] Marsh, George. Marine Composites – Drawbacks and Successes. Reinforced Plastics, July/August 2010, pp. 18-20
- [11] Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrivfars, Komppa. Komposiittirakenteet. Helsinki, Hakapaino Oy, 2007. 483 s.
- [12] Carbon fibre composites poised for dramatic growth. Reinforced Plastics, May 2009

- [13] Henne, M., Sutter, S., Weimer, C. Reduction of Process Cycle Time and Improvement of Mechanical Properties of Composite Parts Manufactured in Resin Transfer Molding by Application of Grilon MS Binder Yarn. Seico 09, SAMPE EUROPE 30th International Conference and Forum, 2009.
- [14] Reichl, Marcus. Composites meet aviation requirements. Reinforced Plastics June (2007). pp. 38-40
- [15] Vlot and Gunnink. Fibre Metal Laminates. AH Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001
- [16] Kong, C., Bang, J., Sugiyama, Y. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life. Energy 30 (2005), pp. 2101-2114
- [17] Summerscales, J., Searle, T.J. Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures. Proceedings of the IMechE, Volume 219, Part L (2005), pp. 45-58
- [18] Harris, D., Cousins, T., Murray, T.M., Sotelino, E.D. Field Investigation of a Sandwich Plate System Bridge Deck. Journal of Performance of Constructed Facilities, Volume 22, No. 5. (2008), pp. 305-315
- [19] Robinson, M.J., Kosmatka, P.E. Development of a Short-Span Fiber-Reinforced Composite Bridge of Emergency Response and Military Applications. Journal of Bridge Engineering, Vol. 13 July/August (2008). pp 388-397
- [20] Gay, D., Hoa. S.V., Tsai, S.W. Composite Materials: Design and Applications. CRC Press, 2003
- [21] Petrie, E.M. Handbook of adhesives and sealants. New York, McGraw-Hill, 2000
- [22] Vanttaja, I., Karppi, R., Lahtinen, T., Tiainen, T. Kevytrakenteiden liimaus ja pitkäaikaistakestävyys vaativissa olosuhteissa. Espoo, 2001
- [23] Hertzberg, Tommy. LASS, Lightweight Construction Applications at Sea. Borås, SP Technical Research Institute of Sweden, 2009

LIITE 1. SAHATTUJEN LIIMANÄYTTEIDEN MITAT

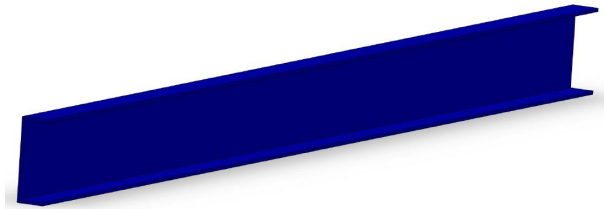
Sahattujen liimanäytteiden mitat

Näytteen numero	Ohut pää (mm)	Paksu pää (mm)	Erotus (mm)
1	20.11	20.2	0.09
2	19.96	20.01	0.05
3	20.46	20.55	0.09
4	19.33	19.62	0.29
5	20.4	20.77	0.37
6	20	20.2	0.2
7	20.12	20.41	0.29
8	19.02	19.15	0.13
9	18.83	19.27	0.44
10	20.53	20.71	0.18
11	19.21	19.21	0
12	20.6	21.22	0.62
13	18.48	19.06	0.58
14	19.24	19.54	0.3
15	19.87	20.1	0.23
16	19.81	20.15	0.34
17	19.59	19.7	0.11
18	20.33	20.64	0.31
19	19.85	20.1	0.25
20	19.16	19.34	0.18

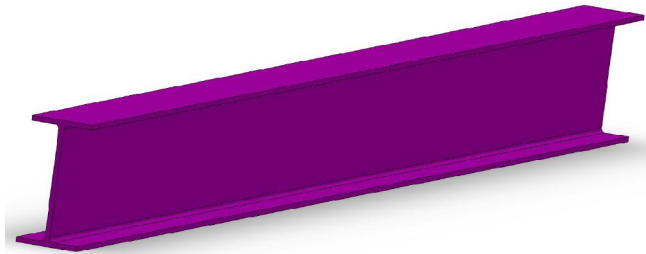
LIITE 2. LIIMANÄYTESAUVOJEN MITAT, MURTOKUORMAT SEKÄ VETOLEIKKAUSLUJUUDET

	Näytteen numero	Liitoksen pituus	Näkyvä huokoisuus	Liitoksen leveys	Sauman ala	Murtokuorma	Vetoleikkauslujuus
Näytteet		mm	mm ²	mm	mm ²	N	MPa
Crestabond							
5 ja 10	I	18.8	0	20.7	389.3	5344	13.73
12 ja 18	II	18.7	9.5	20.6	376.5	3621	9.62
7 ja 3	III	17.3	20.12	20.4	333.0	3365	10.11
1 ja 6	IV	18.5	0	20.2	373.7	4298	11.50
16 ja 19	V	20.7	0	20.1	416.1	5528	13.29
Araldite							
15 ja 2	VI	16.45	0	20.0	329.2	5610	17.04
4 ja 17	VII	19.35	0	19.6	379.6	5965	15.71
14 ja 20	IIX	20.9	0	19.3	404.2	6591	16.31
9 ja 11	IX	20.8	0	19.2	399.6	5264	13.17
13 ja 8	X	17.6	0	19.1	335.5	5406	16.12

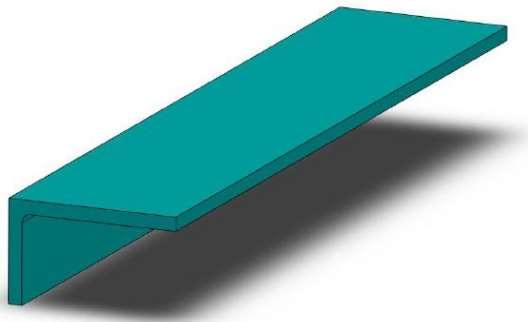
LIITE 3. SAHAUSOHJE



1. Aluksi sahataan kaksi U-palkkia kolmeen yhtä pitkään osaan eli yhteensä 6 x 2000 mm.



2. Seuraavaksi sahataan I-palkki kolmeen yhtä pitkään osaan eli 3 x 2000 mm.
3. Seuraavaksi sahataan L-palkki pienempiin osiin. Ensin siitä sahataan 9 x 454 mm paloja, sitten 12 x 100 mm paloja ja lopuksi vielä yksi 1 x 454 mm pala. Tämä sen takia, että vannesahalla on helpompi sahata pidempiä paloja.



4. Pienemmistä paloista jyskitään toisesta reunasta 45 millimetriä pois (mitta siis 55mm x 100mm).
5. Pidemmistä L-paloista neljästä jyskitään toisesta reunasta 40 millimetriä pois (mitta siis 60x100).
6. Lopulta pitäisi olla taulukon mukaisesti tavaraa:

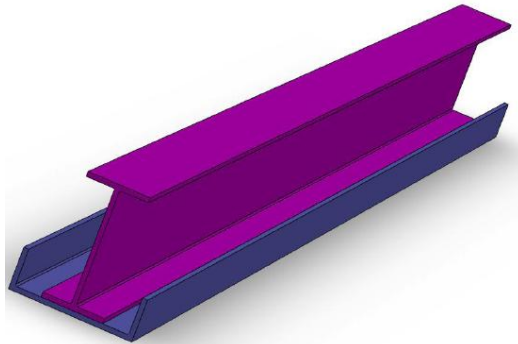
I-palkki	U-palkki	L-palkki
3 x 2000 mm	6 x 2000 mm	12 x (55x100x100)
		6 x (60x100x454)
		4 x (100x100x454)

LIITE 4. HIONTAOHJE

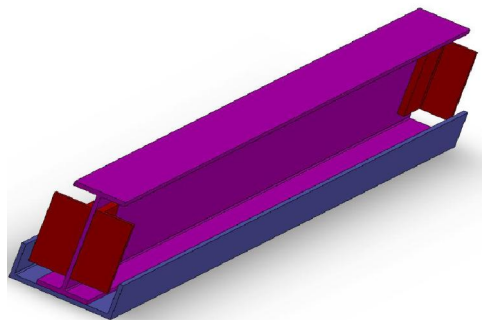
1. Hionnassa hiotaan kaikki pinnat kerralla valmiiksi. Tämä siksi, että homma on sangen epämiellyttävää. Hionta suoritetaan ulkona paineilmalla toimivalla hiomalaitteella ja riittävä suojavaarustus on suositeltavaa. Tarvittava suojavälineistö on suojaapuku, suojalasit, hengityssuojain ja lasikuidun kestävät työhanskat.
2. Aivan ensimmäisenä merkitään hiottavat kohdat tussilla.
3. Hionnan tavoitteena on saada palkkien kiilto pois, mutta olla kuitenkin riittävän varovainen sen suhteen, että kuidut eivät tule esiin.
4. Ensin hiotaan I-palkit. I-palkeista hiotaan molemmat päällyspinnat, eli hiottavia kohtia on yhteensä 6 kpl. Tämän lisäksi L-palojen kiinnityskohdat tulee hioa. Hiottavia kohtia on siis 12 kappaletta. Periaatteessa päätkin pitäisi hioa, mutta ne voidaan hioa myös käsihiomapaperilla myöhemmin.
5. Seuraavaksi hiotaan U-palkit. Niistä hiotaan reunat sekä U:n sisäpuoli. Kaikkia reunoja ei tarvitse hioa, vaan reunimmaisten palkkien reunat jätetään hiomatta. Reunoja on siis hiottavana yhteensä 8 kpl ja sisäpintoja 6 kpl. U-palkkien yläpuolien reunat tulee hioa noin kymmenen sentin matkalta, jotta kantava L-palkkirakenne saadaan kunnolla kiinni.
6. Sitten siirrytään pienten L-palkkien hiontaan. Ne hiotaan molemmilta ulkopinnoiltaan.
7. Viimeisenä hiotaan päihin tulevat L-palkit. 100x100- leveistä hiotaan kahdesta ensimmäisestä molemmat sisäpinnat. Kahdesta toisesta hiotaan molemmat ulkopinnat sekä toinen sisäpinnoista. 100x60- leveille tehdään muuten samalla tavalla, mutta ulkopinnoista hiotut kappaleet hiotaan kapeammalta sisäpinnaltaan.

LIITE 5. LIIMAUSOHJE

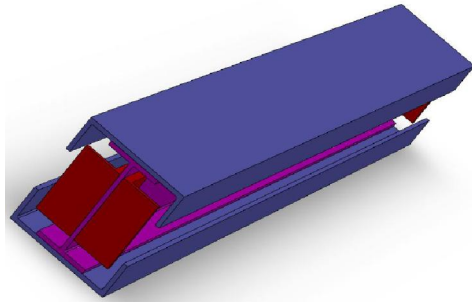
1. Aluksi tarvitaan hiomapaperia sekä asetonia. Muita tarvittavia asioita ovat suojatakki, suojakäsineet, hengityksensuojain, jokin työkalu liiman levittämiseen, liimansekoitusastia, liimansekoitustyökalu sekä riittävästi ruuvipuristimia. Liiman levitykseen käytetään Crestabondin osalta valmiita muovisia sekoituspäitä ja Aralditelle pientä muovirasiaa sekä muovilastaa.



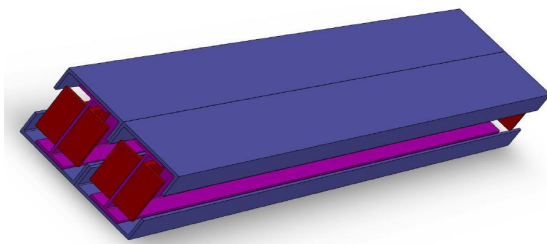
2. Ensin liimataan kaksimetrisen I-palkki U-palkin päälle ja sama toistetaan kolme kertaa. Käytettävä liima on Crestabond. On huomioitava, että palkki tulee mahdollisimman keskelle. On mahdollista käyttää jonkinlaista jigia U-palkin reunojen välillä. Jigin paksuus tulisi olla noin 30 millia. Tämän lisäksi palkkia tulee saada nostettua ainakin millimetrin verran siiman avulla, jotta liimasaumasta tulee riittävän paksu. Siima voidaan pyörittää tässä vaiheessa palkkien ympärille. Liimaukseen tarvitaan kaksi henkilöä.



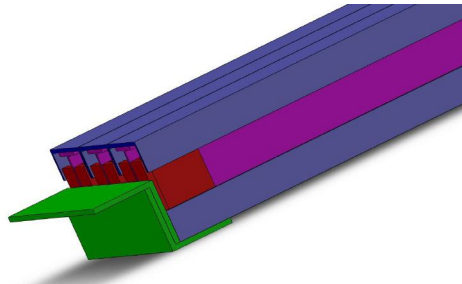
3. Seuraavaksi liimataan 12 kappaletta L-palkkeja olemassa oleviin L- ja U-palkkien yhdistelmiin. Läpät liimataan pidemmältä sivultaan I-palkkien päälle. Käytettävä liima on epoksi. Käytännössä kannattaa liimata kerrallaan yksittäisiä läppiä per puoli. Tässä kannattaa tehdä pieni muutos kuvaan verrattuna eli liimata läpät palkin alapäähän, koska läppiä ei muuten saada puristettua kunnolla paikoilleen. Tämän voi tehdä yksin.



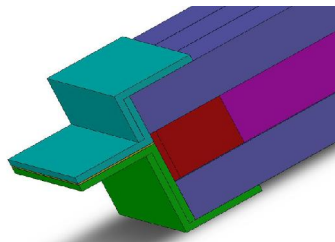
4. Kolmas liimausoperaatio on U-palkin liimaaminen aikaisemman rakenteen päälle. Käytännössä samat ongelmat kuin ensimmäisessä vaiheessa, mutta tässä kannen laittamisessa voi tulla huomattavia ongelmia sillä vastaavien jigien käyttö ei ole yhtä helppoa. Toisaalta tässä tilanteessa on tukeva alusta ja puristimien käyttö on helpompaa. Liimana on PMMA ja tarvittava henkilömäärä on kaksi.



5. Seuraavaksi liimataan isot paneelit toisiinsa. Yksi paneeli liimataan kerrallaan ja laitetaan päällekkäin kuivumaan. Tässäkin pitää laittaa siima keskimmäisen paneelin ympärille riittävän liimasauman varmistamiseksi. Ehkä kriittisin liimaus, joten pitää olla tarkkana. Paneelit voi puristaa päistään kiinni liimauksen varmistamiseksi. Liimana on PMMA ja henkilöitä tarvitaan kaksi kappaletta.



6. Sitten reunojen liimaus. Ensin liimataan reunoihin tulevat L-palkit toisiinsa siten, että 100x100- palkit ja 100x60- palkit muodostavat omat reunapalansa. Käytettävä liima on epoksi. Kun reunat ovat kuivuneet, 100x100- palat voidaan liimata paneeliin epoksilla. Nämä vaiheet vaativat raskaan paneelin takia kaksi henkilöä.



7. Viimeinen liimaus on 100x60 -palojen kiinnittäminen. Tässä käytetään molempia liimoja. Palat liitetään paneeliin epoksilla ja 100x100/60x100- sidos tehdään Crestabondilla ylä- ja alatuen suuren välimatkan takia. Tämän voi tehdä yksin.

LIITE 6. LIIMAUKSEEN LIITTYVÄ DATA

Liimattavat kappaleet	Sauman ala dm ²	Liima	Aloitusaika	Lopetusaika	Puristusaika h
1. U-palkki ja I-palkki	15.0	CB	23/03 16:00	25/03 15:00	47
2. U-palkki ja I-palkki	15.0	CB	23/03 16:10	25/03 15:00	47
3. U-palkki ja I-palkki	15.0	CB	23/03 16:20	25/03 15:00	47
4. Läppä I-palkkiin	1.0	A	25/03 15:10	27/03 15:00	48
5. Läppä I-palkkiin	1.0	A	25/03 15:15	27/03 15:00	48
6. Läppä I-palkkiin	1.0	A	25/03 15:20	27/03 15:00	48
7. Läppä I-palkkiin	1.0	A	25/03 15:25	27/03 15:00	47.5
8. Läppä I-palkkiin	1.0	A	25/03 15:30	27/03 15:00	47.5
9. Läppä I-palkkiin	1.0	A	25/03 15:35	27/03 15:00	47.5
10. Läppä I-palkkiin	1.0	A	27/03 15:05	28/03 15:20	24
11. Läppä I-palkkiin	1.0	A	27/03 15:10	28/03 15:20	24
12. Läppä I-palkkiin	1.0	A	27/03 15:15	28/03 15:20	24
13. Läppä I-palkkiin	1.0	A	27/03 15:20	28/03 15:20	24
14. Läppä I-palkkiin	1.0	A	27/03 15:25	28/03 15:20	24
15. Läppä I-palkkiin	1.0	A	27/03 15:30	28/03 15:20	24
16. U-palkki I-palkin päälle	15.0	CB	28/03 16:20	29/03 14:30	22
17. U-palkki I-palkin päälle	15.0	CB	28/03 16:30	29/03 14:30	22
18. U-palkki I-palkin päälle	15.0	CB	28/03 16:40	29/03 14:30	22
19. Iso palkki toisen päälle	20.0	CB	29/03 15:30	30/03 15:00	23.5
20. Iso palkki toisen päälle	20.0	CB	30/03 15:20	31/03 14:00	22.5
21. 100x450 yhteenliimaus	4.1	A	30/03 15:30	31/03 14:00	22.5
22. 100x450 yhteenliimaus	4.1	A	30/03 15:40	31/03 14:00	22.5
22. 100x450 reunaan	7.0	A	31/03 15:20	03/04 13:30	70
23. 100x450 reunaan	7.0	A	31/03 15:30	03/04 13:30	70
24. 60x450 yhteenliimaus	2.3	A	31/03 15:00	01/04 15:20	24
25. 60x450 yhteenliimaus	2.3	A	01/04 15:30	03/04 13:30	46
26. 60x450 reunaan	5.0	A	03/04 14:15	05/04 09:15	43
27. 60x450 reunaan	5.0	A	03/04 14:30	05/04 09:15	43
28. 60x100 toisiinsa	4.5	CB	03/04 14:15	05/04 09:15	43
29. 60x100 toisiinsa	4.5	CB	03/04 14:30	05/04 09:15	43

Liimattava pinta-ala 187.94 dm²

CB = Crestabond, A = Araldite 2014

LIITE 7. PUDOTUSTESTAUKSEN DATA

Testin numero	Testikappale	Pudotuskorkeus m	Iskuenergia J	Yläpinta	Alapinta	Lisätiedot
1	1.0	0.5	44.99	5 cm halkema	10 cm halkeama	Testauksen testaus
2	1.1	0.25	22.49	Pieni jälki	5 cm halkeama	Epäonnistunut
3	2.1	0.5	44.99	5 cm jälki	10 cm halkeama	Epäonnistunut
4	2.2	0.75	67.48	Pieni jälki	15 cm halkeama	Epäonnistunut
5	3.1	0.25	22.49	Pieni jälki	10 cm halkeama	Jäykistimien väliin
6	3.2	0.5	44.99	Pidempi halkeama	15 cm halkeama	Jäykistimien väliin
7	2.3	0.75	67.48	Pieni jälki	80% repeämä kuituja pitkin	Jäykistimien väliin
8	2.4	1	89.98	Vakava repeämä	100% repeämä kuituja pitkin	Jäykistimien väliin
9	1.3	1.25	112.47	Vakava repeämä	Vakava repeämä	Jäykistimien väliin
10	1.4	1	89.98	Pieni jälki	Pientä repeämistä	Jäykistimen kohdalle
11	1.5	1.25	112.47	Pieni jälki	Pientä repeämistä	Jäykistimen kohdalle
12	3.3	1.5	134.97	Pieni jälki	Pientä repeämistä kuituja vastaan	Jäykistimen kohdalle